

Lappeenrannan-Lahden Teknillinen yliopisto LUT
LUT Energiajärjestelmät
Konetekniikka

Saku Vesanen

PUTKISILTOJEN SUUNNITTELUOHJE

08.12.2022

Tarkastajat Professori Timo Björk
D.Sc. Antti Ahola

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden Teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Konetekniikka

Saku Vesanen

Putkisiltojen suunnitteluohje

Diplomityö

2022

76 sivua, 29 kuvaa, 10 taulukkoa ja 4 liitettä

Tarkastaja: Professori Timo Björk
D.Sc. Antti Ahola

Hakusanat: Teräsrakenteet, Putkisillat, Suunnitteluohje

Tässä diplomityössä tutkitaan putkisiltojen suunnitteluun vaikuttavia seikkoja. Diplomityö tehtiin AFRY Finland Oy:n Prosessiteollisuus-divisioonalle, joka vastaa muiden muassa teollisuuslaitosten rakenteiden suunnittelusta. Putkisiltojen suunnittelua ei käsitellä juurikaan standardeissa, vaan suunnittelijan vastuulle jää usein soveltaa ohjeita ja standardeja suunnittelussa. Suunnittelijoilla kuluu paljon aikaa perustietojen soveltamiseen, mikä lisää suunnitteluun käytettävää aikaa. Tämä työ toimii suunnitteluohjeena rakennesuunnittelijoille suunnittelun alkuvaiheessa.

Aluksi tehtiin kirjallisuuskatsaus teollisuuden ohjeisiin, tutkimusartikkeleihin ja standardeihin, mitkä käsittelevät teräsrakenteiden ja putkisiltojen suunnittelua. Kirjallisuudesta löydettiin putkisiltojen suunnittelua koskevia ohjeita. Putkiston kitkakuormitusten suuruus määritetään kannatustasolle tuetun putkiston painon ja määrän perusteella. Putkisillan rakennejärjestelmä tulee suunnitella välttämään lukkiutumien, mikä voi aiheutua lämpölaajenemisen seurauksena. Rakenteen lukkiutuessa rakenteeseen syntyy ylimääräisiä voimia. Monista tässä työssä esitellyistä seikoista tulee sopia hankekohtaisesti vaadittavien osapuolien kesken.

Työssä laadittiin laskentamalleja paikoilleen rakennettavasta putkisillasta ja konepajalla koottavasta moduulista, joka kuljetetaan työmaalle. Työmaalle kuljetettavan moduulin etuina ovat paremmat olosuhteet rakentamiselle ja työmaaliikenteen häiriöiden välttäminen. Verrattuna paikoilleen rakennettavaan putkisillan moduuli vaihtoehdossa materiaalia kuluu enemmän. Modulaarisen rakenteen päätykehä tulee suunnitella jäykällä liitoksilla ja suuremmilla poikkileikkauksilla kuin moduulin muut sauvat. Laadituissa laskentamalleissa toteutettiin vertailu myös Pratt- ja modifioidun Warren-ristikon välillä. Tutkittavien ristikoiden väliset erot olivat pieniä käytetyn materiaalin mukaisesti laskettuna.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT
LUT School of Energy Systems
Mechanical Engineering

Saku Vesanen

Design guide of the pipe bridges

Master's thesis

2022

76 pages, 29 figures, 10 table and 4 appendices

Examiner: Professor Timo Björk
D.Sc. Antti Ahola

Keywords: Steel structures, Pipe bridges, Design guide

In this thesis factors affecting designing pipe bridges are studied. This thesis is made for AFRY Finland Oy Process industries division, which is responsible for designing structures of industrial facilities among other things. Designing of pipe bridges is not covered much in standards, but rather it is designer's responsibility to apply instructions and standards in designing. Designers use a lot of time on applying basic concepts, which increases required time for project. This thesis works as design guide in the start of the project.

At start, a literature review was conducted into instructions of industry, research articles and standards, which cover designing steel structures and pipe bridges. In literature several guiding factors were found for designing pipe bridges. Structural system of pipe bridge should be designed to avoid lock-in bracing, which can be result of thermal expansion of bridge structure. Lock in of structure creates additional loading case on structural system. During the pipe bridge designing all necessary parties should agree upon on many factors presented in this thesis.

In this thesis work calculation models were created using Autodesk Robot Structural Analysis software. Calculation models were simulating on site built structure and off site built structure, which is assembled on workshop premises. Off site assembling advantages are in better in avoiding site congestion. Compared to on site built structure, off site built modules require material consumption is higher. Especially controlling deflections in serviceability conditions are challenging in case of off site built structure. End frames of modules should be designed as rigid frames with larger cross-sections than other members of module. Pratt- and modified Warren-trusses were studied. Examined trusses showed little differences in material consumption.

ALKUSANAT

Haluaisin kiittää professori Timo Björkiä työn ohjaamisesta ja tarkastamisesta. Samoin Jari Lehtiötä ohjauksesta ja avusta työn suorittamisessa. AFRY Oy:n Vantaan konttorilla on myös useampi henkilö, jotka ovat auttaneet ja neuvoneet työssä heränneissä kysymyksissä. Kiitos kuuluu myös heille.

Lopuksi vielä vaimolleni Elizavetalle kuuluu iso kiitos avautumisten kuuntelemisesta työn edetessä. Kiitos myös heille, jotka innoittivat aloittamaan opinnot, mutta eivät ehtineet nähdä niiden loppua.

Saku Vesanen

Saku Vesanen

Vantaalla 08.12.2022

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO	9
	1.1 Putkisilta	12
	1.2 Kirjallisuuskatsaus	15
	1.2.1 Modularisointi.....	16
	1.2.2 Putkisiltojen erityiset kuormitustapaukset	17
2	TUTKIMUSMETODIT	20
	2.1 Tutkimuskysymykset.....	21
	2.2 Esimerkkilaskennan lähtötiedot.....	22
3	PUTKISILTOJEN KUORMITUKSET	23
	3.1 Putkista aiheutuvat kuormat.....	23
	3.2 Tuulikuorma.....	25
	3.3 Muut luonnonkuormat	28
	3.4 Muut kuormat	29
	3.5 Kuormien yhdistelmät.....	32
4	MUUT VAATIMUKSET	34
	4.1 Siirtymäraajat.....	34
	4.2 Putkiston sijoittelu ja paisuntalenkit.....	35
	4.3 Putkiston tuenta.....	37
	4.4 Laajennusvaraus.....	43
	4.5 Pintakäsittelyjen vaikutus rakennesuunnitteluun.....	43
	4.6 Rakenteen kokoonpanon vaikutus rakennesuunnitteluun.....	48
	4.7 Tilarajoitukset ja varaukset.....	49
	4.8 Maanjäristysten huomioon ottaminen suunnittelussa	51
5	RAKENNEJÄRJESTELMÄN PÄÄMITAT	53
	5.1 Putkisillan rakennejärjestelmän muodon määrittäminen	54

6	LASKENTAMALLI PUTKISILLALLE	56
6.1	Lähtötiedot	59
6.2	Tulokset	62
7	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	64
	LÄHTEET	72
	LIITTEET	

LIITE I: Suomen tieliikennelain mukaiset vaatimukset maantiekuljetukselle.

LIITE II: PSK-Standardin mukaiset vaatimukset teräsputken tuentavälille

LIITE III: Putkisillan poikkileikkausten alkuarvausten laskelma Mathcad Prime 5 ohjelmistossa.

LIITE IV: Putkisillan kuormitusyhdistelmät ASCE 7 mukaisesti.

SYMBOLILUETTELO

A_{ASCE}	ASCE 7 mukainen tuulelle altis pinta-ala [m ²]
A_{EC}	Eurokoodin mukainen tuulelle altis pinta-ala [m ²]
C_{F1}	Tuulen puoleisen rakenteen voimakkeroin
C_{F2}	Suojan puoleisen rakenteen voimakkeroin
$c_{f,ASCE}$	ASCE 7 mukainen rakenneosan dimensioton voimakkeroin
$c_{f,EC}$	Eurokoodin mukainen dimensioton voimakkeroin
$c_{\phi,EC}$	Eurokoodin mukainen dimensioton voimakkeroin ilman päätevaikutuskerrointa
$c_{p,e}$	Eurokoodin mukainen dimensioton kerroin umpinaisen rakenteen tuulikuormalle
$c_s c_d$	Eurokoodin mukainen dimensioton rakennekerroin tuulikuorman laskennassa
D_s	Rakenteen omapaino
D_e	Putkisillalle asetettujen komponenttien tyhjä paino
F_k	Kitkavoima [kN]
G	ASCE 7 mukainen dimensioton puuskakerroin
L_0	Alkuperäinen pituus [m]
q	tasainen viivakuorma [kN/m]
$q_p(z)$	Eurokoodin mukainen tuulen puuskanopeuspaine korkeudella z [kPa]
q_z	ASCE 7 mukainen tuulen paine [kPa]
u	Rakenteen eheyden, tuulta vastaan olevan leveyden ja kappaleiden välisen etäisyyden huomioon otettava dimensioton kerroin perättäisten rakenteiden tuulikuormien laskennassa
V_g	Nosturin nostovoima
α	Materiaalin lämpölaajenemiskerroin [1/°C]
μ_k	Materiaalin dimensioton kitkakerroin
ΔL	Lämpöpiteneminen [m]
ΔT	Tarkasteluhetken lämpötilan ja asennuslämpötilan ero [°C]
φ	Eurokoodin mukainen dimensioton eheysuhde
ψ_λ	Eurokoodin mukainen dimensioton päätevaikutuskerroin

γ_{Load}	Nostokuorman varmuuskerroin
γ_s	Materiaalin varmuuskerroin noston kuormituksessa
γ_{L+H}	Noston ja käsittelyn vaikutukset huomioiva varmuuskerroin
ASCE	American society of civil engineers
ASME	American society of mechanical engineers
PIP	Process industries practices

1 JOHDANTO

Putkisiltojen suunnittelu on merkittävä osa teollisuuslaitoksen suunnittelua. Putkisiltojen tehtävä on kannatella putkistot, kaapelit ja laitteet prosessien välillä. Putkisiltojen tarve nousee esille, kun prosessien välimatka kasvaa merkittävästi. Esimerkiksi kahden rakennuksen välillä kulkee suuri määrä putkia ja putkia ei ole järkevää sijoittaa kulkemaan maanpinnan mukaisesti. Maanpinnan myötäisesti kulkevat putkistot voisivat estää teollisuusalueella kulkevaa liikennettä. Maan alle sijoitettavalle putkistolle puolestaan olisivat omat vaatimukset, jotka voivat olla tarpeettoman ankarat teollisuuslaitoksen käyttötarkoitukseen nähden. Putkisillan kantamat putkistot kuljettavat prosessien vaatimia aineita, kaapelit siirtävät sähköä ja tietoa prosessien välillä, putkisillalle sijoitettavat laitteet säätelevät putkistojen ja kaapeleiden kuljettamia aineita ja tietoja.

Putkistojen onnistunut suunnittelu on merkittävä seikka prosessien toimivuudelle. Rakennesuunnittelijan on tärkeää ymmärtää etenkin putkiston toiminnan vaatimukset. Putkistoissa kulkevat aineet voivat olla ympäristölle haitallisia, jolloin putkiston vaurioituminen aiheuttaa ympäristövahinkoja. Putkiston vaurioituminen voidaan välttää useissa tapauksissa putkisiltojen onnistuneella suunnittelulla.

Putkisiltojen suunnittelu on usein haastavaa, koska siltarakenteeseen kohdistuvat kuormitukset ovat luonteeltaan hyvin erilaisia verrattuna tavanomaisiin teräsrunkoisiin rakennuksiin. Putkisillat ja -telineet kuuluvat standardeissa ja ohjeissa 'muut rakenteet'-kategoriaan. (Drake & Walter 2010.)

Teollisuudessa on suunnitteluohjeita saatavilla putkisiltojen suunnittelua varten. Suunnitteluohjeet ovat käyttökelpoisia, mutta ohjeet perustuvat American society of civil engineers (ASCE) standardeihin ja vaativat rakennesuunnittelijalta aihealueen hallintaa ja ymmärrystä. Ohjeistuksissa oletetaan, että rakennesuunnittelija osaa muuttaa kuormituksista tulevat vaatimukset rakenteen dimensioiksi.

Putkisiltojen suunnittelusta on tehty aikaisempia tutkimuksia ja opinnäytetöitä. Useat tutkimukset suuntautuvat öljynjalostusteollisuuden piiriin. Öljynjalostusteollisuudelle tehdyt tutkimukset ovat usein käyttökelpoisia myös muiden teollisuudenalojen parissa, koska putkisiltojen tehtävä on periaatteiltaan sama. Tutkimuksia voidaan hyödyntää rakennejärjestelmän suunnittelussa, mutta tutkimukset keskittyvät usein pieneen osaan putkisiltojen suunnittelua, eivätkä ne käsittele kokonaisuutta. Aikaisemmat opinnäytetyöt käsittelevät kuormitustapauksia ja rakennejärjestelmän ratkaisuja, mutta ohjeistus itse suunnittelutyöhön jää vähäiseksi. Aikaisemmissa opinnäytetöissä myös kokoonpanon ja pintakäsittelyiden toteuttamisen huomioon ottaminen jää vähäiseksi.

Aiemmat tutkimukset keskittyvät yleisellä tasolla putkisiltojen suunnitteluun liittyvien seikkojen käsittelyyn. Esimerkiksi Bedair (2014) ja Drake & Walter (2010) antavat ohjeistuksia putkisiltojen suunnitteluun. Työssään Bedair (2014) käsittelee paikoilleen nostettavien rakenteiden etuja verrattuna perinteisiin paikoilleen rakennettuihin rakenteisiin. Lisäksi, työssä löytyy näkökohtia kuljettamisen ja nostamisen huomioon ottamiseen suunnittelutyössä. Bedairin tärkeimpinä löydöksinä voidaan pitää suurempaa materiaalin kulutusta ja suunnitteluun käytetyn ajan käyttöä paikoilleen nostettavissa moduuleissa. Drake & Walter (2010) käsittelevät työssään tyypillisesti käytettyjä pintakäsittelyjä ja niiden etuja korroosiolta suojaamisessa, mutta pintakäsittelyiden toteuttamisen vaikutus rakenteiden suunnitteluun jää käsittelemättä. Drake & Walter (2010) korostavat myös työssään standardien noudattamisen vaikeuden putkisiltojen suunnittelussa.

Putkiston tuenta on tärkeä aihepiiri rakennesuunnittelijalle ymmärtää. Putkiston tuenta vaikuttaa merkittävästi putkisillan rakennejärjestelmän suunnitteluun. Rakennesuunnittelijan tehtävänä on suunnitella putkisilta kantamaan putkistojen, kaapeleiden ja laitteiden aiheuttamat kuormitukset. Putkistosuunnittelijan tehtäviin kuuluu putkiston mitoitus ja tuennan suunnittelu. Putkistosuunnittelija ilmoittaa putkiston tuennan kuormitukset suunnittelun tuloksena rakennesuunnittelijalle. Rakennesuunnittelijan ja putkistosuunnittelijan välinen yhteistyö on tärkeää putkisillan suunnittelun onnistumiseksi. (Smith & Van Laan 1987, s. 85.)

Putkisillan rakenteiden valmistuksessa, asennuksessa ja käsittelyssä on seikkoja, mitkä ovat tärkeitä ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Putkisillan asennus voidaan toteuttaa paikoilleen rakennettavana rakenteena tai paikoilleen nostettavana moduulina. Asennustapa on

merkittävä tekijä nostojen ja kuljetusten suunnittelussa. Asennustapa vaikuttaa myös suuresti kokoonpano-olosuhteisiin.

Putkisillan rakenteet tulee suojata olosuhteiden vaatimilla pintakäsittelyillä korroosiota vastaan. Yleisimmät käytetyt pintakäsittelyt ovat maalaus ja kuumasinkitys. Kummallakin pintakäsittelyllä on omia ominaispiirteitä, jotka ovat tärkeitä ottaa huomioon rakennejärjestelmän suunnittelussa. Vaatimusten tarkoituksena on varmistaa pintakäsittelyn onnistuminen. Etenkin paikoilleen nostettavan moduulin tapauksessa kuljetus ja pintakäsittely rajoittavat suurimpia mahdollisia mittoja kustannusten ja prosessien omien rajoitteiden takia. Rakennesuunnittelijan tulee ottaa huomioon nämä rajoitteet laatiessaan rakennejärjestelmää.

Tämän työn tavoitteena on ohjeistaa rakennesuunnittelijaa putkisiltojen suunnittelussa. Ohjeistus perustuu teollisuuden ohjeisiin, tutkimuksiin, standardeihin ja kokeneempien suunnittelijoiden näkemyksiin. Ohjeistusta hyödyntäen rakennesuunnittelija pystyy valitsemaan sopivan rakennejärjestelmän ja luomaan laskentamallin sen pohjalta. Tässä työssä liitosuunnittelu on rajattu pois työn sisällöstä. Liitoksille asetetaan kuitenkin vaatimuksia laskentamallia laadittaessa, mutta liitosten tarkempaa suunnittelua ei oteta huomioon. Työssä käsitellään rakennetta, jossa putkisto suunnitellaan kulkemaan kahdella tai useammalla päällekkäisellä tasolla.

Tämä työ koostuu kirjallisuuskatsauksesta ja laskennallisesta osuudesta. Kirjallisuuskatsaus kohdistuu teollisuuden ohjeisiin, standardeihin ja tutkimuksiin. Suunnittelun ohjeistus perustuu kirjallisuuskatsaukseen, jota täydennetään kokeneempien suunnittelijoiden näkemyksillä. Laskennallisessa osuudessa esitellään erilaisten kirjallisuuskatsauksen mukaisten ratkaisujen vaikutuksia putkisillan rakennejärjestelmään.

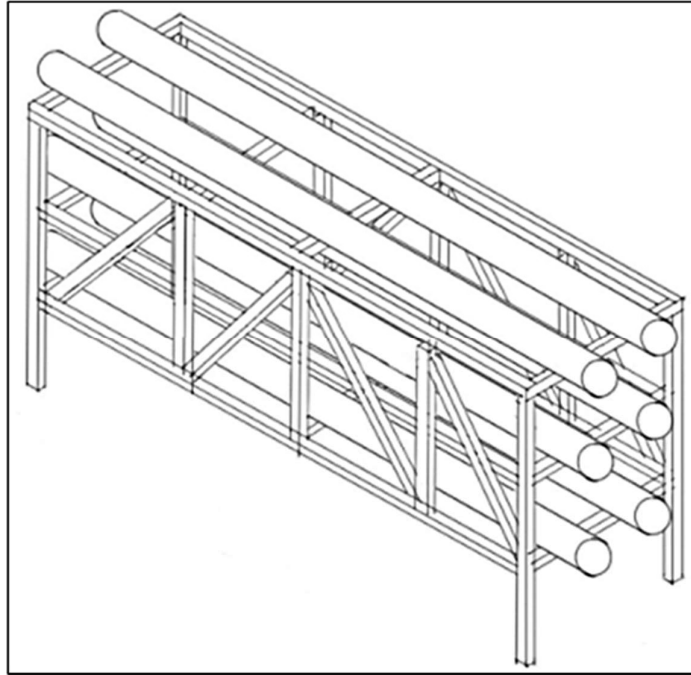
Tämä työ tehtiin AFRY Finland Oy prosessiteollisuus-divisioonalle. AFRY on kansainvälinen suunnittelu- ja konsulttityhtiö, jonka palveluksessa on yli 16000 työntekijää maailmanlaajuisesti yli 50:ssä maassa. Prosessiteollisuus-divisioona vastaa muun muassa teollisuuskohteiden rakenteiden suunnittelusta. (AFRY 2021a.)

Työnaihe nousi esille, kun yritykselle koettiin tarvetta laatia ohjeistus putkisiltojen suunnitteluun. Ohjeistuksella haetaan tukea etenkin hankkeiden alkuvaiheissa, kun lähtötietoja selvitetään tarkempaa suunnittelua varten. Työn tarvetta lisää kestävä kehitys mukautettujen arvojen noudattaminen, koska materiaalin käyttö on keskeinen tekijä hankkeen hiilijalanjäljen määrittämisessä. Putkisiltojen tapauksessa rakenteen ylimitoitus tapahtuu herkästi, mikä ei ole kannattavaa.

Rakenteen ylimitoituksen välttämiseksi kirjallisuuskatsauksen merkittävimpinä tavoitteina on määrittää sovellettavia kuormituksia ja muita vaatimuksia. Muihin vaatimuksiin lukeutuu muiden muassa putkisillan sallitut siirtymäraajat ja laajennusvaraus, pintakäsittelyn vaatimukset ja putkiston sijoittelu. Kuormitusten ja muiden vaatimusten perusteella esitellään putkisillan rakennejärjestelmän päämittojen määräytymistä. Rakennejärjestelmän luonnostelusta siirrytään laskentamallin laatimiseen Autodesk Robot Structural Analysis-ohjelmistoa käyttäen. Esiteltyjä seikkoja ja ohjelmiston antamia tuloksia arvioidaan työn lopussa. Työn liitteisiin on sijoitettu putkiston tuentaan liittyviä taulukoita ja kuljetuksen ulkomittoja käsittelevää asiaa.

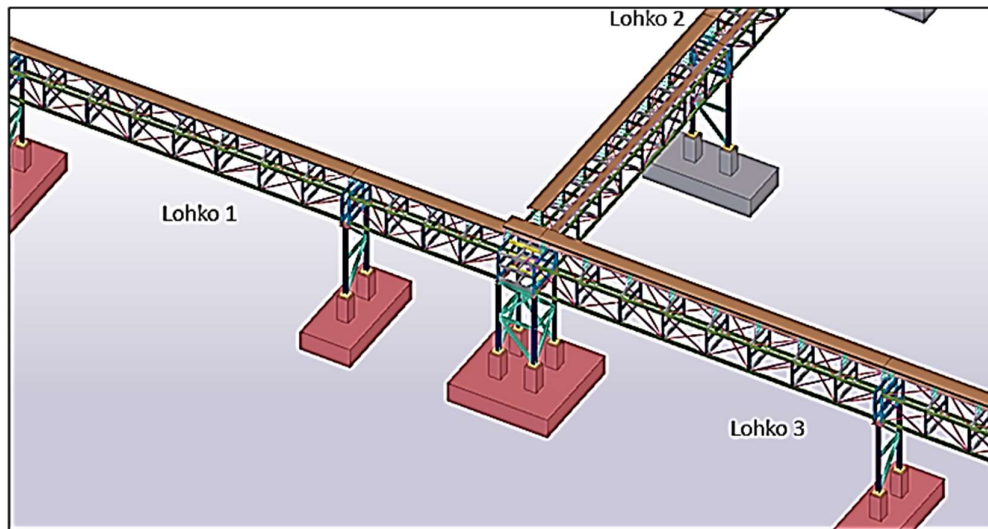
1.1 Putkisilta

Kuva 1 esittää ristikkorakenteista putkisiltaa (Bridge brothers Inc 2021). Esimerkki tapauksessa on kolme kannatinpalkkitasoa, joihin putket ovat tuettu. Putkiston lisäksi kannatinpalkkeille voidaan tukea kaapelihyllyjä ja kulkuteitä. Kannatinpalkit ovat tuettu ristikon vertikaalisauvoihin, kuten kuvan 1 esimerkistä käy ilmi. Kannatinpalkkien väli määräytyy putkiston vaatiman tukivälin perusteella. Esimerkiksi DN50 kokoinen putki vaatii tukiväliksi PSK 7304 mukaan 3,5 metriä (PSK Käsikirja 8, 2019 s. 34). Kaapelihyllyille asetetaan rakennusten väliset tietoliikenne- ja sähkökaapelit, ja tarvittaessa pienet putket. Pienet putket mielletään yleensä DN50 tai pienemmiksi putkiksi (Inspectioneering 2021).



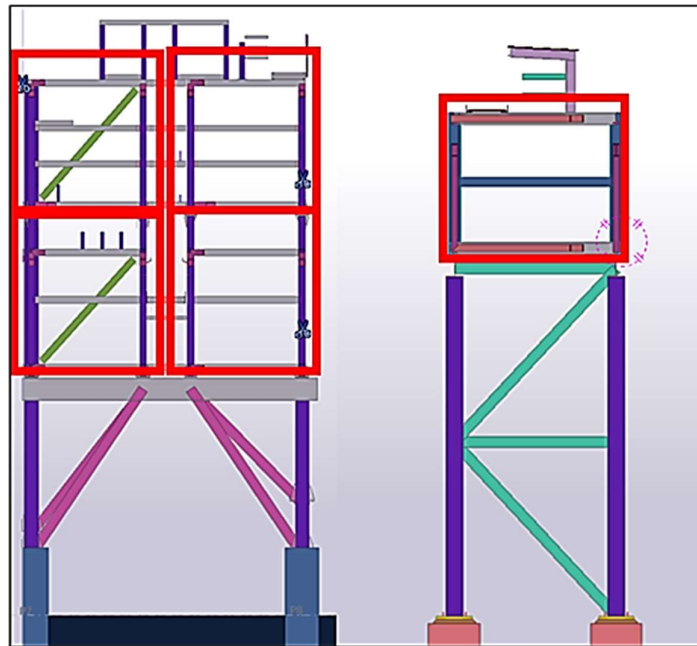
Kuva 1. Putkisillan ristikkorakenne, joka kantaa putkia kolmella kannatin tasolla (Bridge brothers 2021).

Kuva 2 esittää putkisillan jakoa lohkoihin. Putkisillan jako lohkoihin on tarpeellista, koska perättäisten ja risteävien moduulien vaatimukset voivat olla hyvinkin erilaisia. Eniten lohkojakoon vaikuttaa putkisillan osuudella kulkevien putkien määrä. Putkisillan lohko voi koostua useasta moduulista, mikäli putkisillan osuudella vaatimukset pysyvät samanlaisina. Putkisillan lohkojen risteyksiin sijoitetaan usein neljän pilarin muodostama torni tyypillisen kahden pilarin muodostaman kehän sijaan. Neljän pilarin muodostamaan rakennejärjestelmä on helpompi tukea useampi moduuli. Neljän pilarin rakennejärjestelmiä voidaan myös sijoittaa putkisillan suorille osuuksille suurien kuormitusten takia. Jalkojen sijoittelusta kirjoitetaan tarkemmin myöhemmin tässä työssä.



Kuva 2. Esimerkki putkisillan jakamisesta lohkoihin (AFRY 2021b).

Putkisillan mittojen kasvaessa rakennesuunnittelija joutuu ottamaan huomioon kuormitusten lisäksi valmistuksen, kokoonpanon ja asennuksen vaatimuksia. Muiden vaatimusten johdosta moduulien suurimmat mahdolliset mitat voivat rajoittaa suunnittelua. Kuva 3 esittää rakennejärjestelmää, jossa suuremman moduulin poikkileikkauksen mitat ovat kasvaneet suuremmiksi kuin muiden vaatimusten sallimat mitat. Ratkaisuna on se, että suurempi moduuli on jaettu pienemmiksi moduuleiksi. Pienemmät moduulit nostetaan paikoilleen yksi kerrallaan. Muita vaatimuksia käsitellään tarkemmin aiheelle luvussa 4. Jatkossa tässä työssä moduulilla tarkoitetaan paikoilleen nostettavaa putkisiltarakennetta. Paikoilleen rakennettavalle rakenteelle ei käytetä erityisnimityksiä.



Kuva 3. Esimerkki putkisillan jakamisesta moduuleihin. (AFRY 2021b)

1.2 Kirjallisuuskatsaus

Tämä kirjallisuuskatsaus on toteutettu käyttäen Scopus- , Google Scholar- ja SFS Online-tietokantoja. Kirjallisuuskatsauksen keskeisimpänä tavoitteena on luoda laaja-alainen ymmärrys tutkimusongelmaan ja -aiheeseen. Kirjallisuuskatsaukseen sisällytettiin kirjallisuutta, joka käsittelee putkisiltojen suunnittelua tai suunnittelun keskeistä osaa. Keskeisiin osiin sisältyy kuormituksia, teräsrakenteiden suunnittelua, pintakäsittelyä ja putkiston tuentaa käsittelevää kirjallisuutta.

Standardeissa ei käsitellä suoraan putkisiltojen suunnittelua. Putkisiltojen suunnittelussa standardien määräyksiä tulee soveltaa rakennesuunnittelijan omaa harkintaa ja saatavilla olevia ohjeita hyödyntäen. Standardit ja lait pätevät kuitenkin rakenteiden suunnittelussa. Esimerkiksi ASCE:n ja eurooppalaiset Eurokoodit ohjaavat teräsrakenteiden suunnittelua, kuten minkä tahansa muunkin teräsrakenteen suunnittelua. Standardeissa todetaan suoraan joissakin kohdissa, että joistakin yksityiskohdista täytyy sopia asiakkaan kanssa. Asiakkaalla voi olla tarkemmat vaatimukset kuin mitä standardeissa määrätään. Tämä koskee esimerkiksi rajoituksia sallituille siirtymille. (Drake & Walter 2010.)

1.2.1 Modularisointi

Teräsrakenteisen putkisillan modularisointi on joissakin tapauksissa kannattavaa. Rakennuksen tilaajalle rakenteen modulaarisuus näkyy vain hankkeen kustannuksissa ja aikataulussa. Modularisoinnissa perättäiset moduulit suunnitellaan samanlaisiksi olettaen, että geometriset mittavaatimukset pysyvät samoina. Modulaarisen rakenteen suunnittelu vaatii enemmän aikaa itse suunnittelutyöhön verrattuna paikoilleen rakennettavaan rakenteeseen. Suunnittelutyön määrää kasvattaa etenkin kuljetusten, nostojen ja rakennejärjestelmän liittämissä huomioon ottaminen. Edellä mainittujen seikkojen myötä materiaalin käyttö kasvaa 30-50% verrattuna paikoilleen rakennettuun rakenteeseen. (Bedair 2014.)

Modularisoinnista hyötyvät eniten rakentaja ja valmistaja. Modulaarisen ratkaisun etuna saavutetaan yleensä työmaalla tehdyn työmäärän väheneminen. Modulaarisen ratkaisun tapauksessa työmaalla suoritetaan lähinnä jalkojen asennus ja moduulin nosto ja asennus. Jalkojen asennus voidaan olettaa erilliseksi tapahtumaksi, koska moduulin muoto pysyy tällöin laatikkomaisena ilman suuria ulokkeita. Työvoimaa tarvitaan luonnollisesti vähemmän, koska työ tehdään pääasiassa konepajan tiloissa. Hankekohtaisesti voidaan saavuttaa myös korkeampi työnlaatu rakenteiden valmistuksessa ja kokoonpanossa Korkeamman laadun saavuttamiseen kuitenkin vaikuttaa merkittävästi konepajan toiminnan laadukkuus. (Bedair 2014.)

Kuljetusten ja nostojen olosuhteet vaikuttavat merkittävästi moduulien suunnitteluun. Hankekohtaisesti odotetut luonnonolot vaikuttavat nostojen suunnitteluun. Nostojen suunnittelua varten rakennesuunnittelijan tulee määrittää nostopisteet rakenteeseen. Nostojen kuormitukset ovat huomionarvoinen seikka, joka vaikuttaa laskentamallin laatimisessa. Kuljetukseen liittyvät määräykset vaihtelevat hankekohtaisesti. Kuljetusmuodosta johtuen moduuleille voidaan asettaa mitta- ja painorajoituksia. (Bedair 2014.) Erikoiskuljetukset ovat luvanvaraisia, ja vaativat erityisjärjestelyjä. Erityisjärjestelyt sisältävät kuljetuksen mitoista määräytyen esimerkiksi riittävän määrän varoitusautoja. (17.12.1992/1715.) Luonnollisesti kuljetuksen kustannukset kasvavat kun erityisjärjestelyiden monimutkaisuus kasvaa (Ongelin & Valkonen 2010, s. 549).

1.2.2 Putkisiltojen erityiset kuormitustapaukset

Putkisiltojen kuormitukset ovat rakennesuunnittelijalle erityisen haastava seikka huomioon otettavaksi. Standardit eivät käsittele putkisiltojen kuormituksia yksityiskohtaisesti, vaan rakennesuunnittelijan tulee itse soveltaa standardien määräyksiä kuormitusten arvioimiseen. Putkisiltoja kuormitetaan putkiston, kaapeleiden ja laitteiden painolla. Putkistosta syntyy pituussuuntaisia kuormituksia lämpötilojen muutoksesta johtuen. Putkiston lämpötila muuttuu käytön ja ulkolämpötilan seurauksena. Putkisto voi laajentua tai kutistua riippuen olosuhteista. Vertailulämpötilaksi valitaan aina asennuslämpötila. Putkiston tuenta suunnitellaan siten, että putkistossa on yksi kiintopiste, jossa kaikki liike on estettyä. Muissa putkiston tuentapisteissä putkiston pituussuuntainen liike on sallittua. Pituussuuntainen liike aiheuttaa kuitenkin kitkakuormitukset, koska pinnat pääset liikkumaan toistensa suhteen kosketusvuorovaikutuksessa. Kitkakuorma ei ole globaalissa tarkastelussa kuitenkaan kovinkaan merkittävä kuormitus. Paikallisessa tarkastelussa kitkakuormitus on merkittävä, koska tyypillisesti kitkakuorma kuormittaa kannatinpalkin heikompa akselia. Kitkakuormituksella mitoitetaan ensisijaisesti putkiston tuentaan käytettäviä palkkeja. Laskentamalliin kitkakuorma tulee asettaa vaikuttamaan kannatin palkin ylä- tai alalaippaan. (Bedair 2014.)

Standardit eivät ota kantaa kitkavoiman suuruuteen putkisiltojen rakennejärjestelmissä. Kitkakuormituksen arvioimista ohjaavat teollisuuden ohjeet. Esimerkiksi Process industries practices (PIP) ohje määrittää kitkakuormituksen suuruuden tasolla kulkevien putkien määrän mukaisesti. Kitkakuormituksen 100% arvoa voidaan käyttää tapauskohtaisesti, esimerkiksi kun tasolla kulkee yksi suuri putki. Vierekkäiset putket rajoittavat kitkakuormituksen suuruutta, koska putkilinjojen lämpölaajeneminen ja kutistuminen tapahtuu eriaikaisesti. Eriaikaisuus syntyy putkilinjojen avaamisen ja sulkemisen eriaikaisuudesta. Paikallisessa tarkastelussa käytetään suurempia kitkakuormia kuin globaalissa tarkastelussa. Tyypillisesti globaalin tarkastelun kitkakuormitus on 50% paikallisesta kitkakuormituksesta. Perustelusta syystä voidaan kuitenkin käyttää suurempia kitkakuormia myös globaalissa tarkastelussa. Suurempaa kitkakuormituksen arvoa voidaan käyttää esimerkiksi, kun tuetaan vain yksi suuri putki. (PIP STC010115 2007.)

Pituussuuntaisen lämpöliikkeen johdosta rakennesuunnittelijan tulee olla tarkkana jäykistyksen suunnittelussa. Putkisiltaan suunnitellaan kiintopiste, joka on suotuisaa sijoittaa mahdollisimman lähelle putkisillan lohkon keskipistettä. Kun kiintopiste on putkisillan lohkon

keskipisteessä, muodonmuutokset pääsevät tapahtumaan symmetrisesti. Putkisillan kiintopiste on edullista myös sijoittaa putkiston kiintopisteen läheisyyteen. (Bendapudi 2010b.)

Putkisillan rakenteet laajenevat samalla tavalla kuin putkisto lämpötilan muuttuessa. Putkisillan lohkon rakennejärjestelmään ei tule sijoittaa kahta kiintopistettä, koska rakennejärjestelmä voi lukkiutua. Lukkiutumisen putkisiltaan muodostuu ylimääräisiä kuormituksia lämpöliikkeestä, koska lämpöliike tapahtuu kahden kiinteän pisteen välissä. Rakenteen lukkiutuminen vältetään asettamalla vain yksi kiintopiste putkisillan lohkolle. Lämpötilan aiheuttama pituuden muutos pyrkii tapahtumaan joka tapauksessa. Putkisiltaa kannattelevat pilarit saavat taipua putkiston vaatimusten mukaisesti. Putkisillan pituuden ollessa yli 100 metriä rakennesuunnittelijan tulee harkita muita keinoja lämpöliikkeiden hallintaan. Ratkaisuna voidaan käyttää soikeita reikiä liitoksissa. Alle 100 metriä pitkillä putkisilloilla pilareiden taivutuskestävyyden voidaan arvioida olevan riittävä ottamaan vastaan lämpöliikkeiden aiheuttama kuormitus. (Bendapudi 2010a.)

Putkisto joudutaan joissakin tapauksissa tukemaan kahdella kiintopisteellä samalla suoralla osuudella. Tällöin putkistoon syntyy samanlainen lukkiutumistila. Putkistoon voidaan kuitenkin tehdä paisuntalenkki. Paisuntalenkki hyödyntää putkiston taivutusominaisuuksia. Putkistoon tehdään mutka tai muoto, jolloin lämpöliikkeen aiheuttama voima taivuttaa putkea. Putken taivutus kumoaa siten lämpöliikkeen ja putkisto ei pääse lukkiutumaan. Rakennesuunnittelijan näkökulmasta paisuntalenkki on merkityksellinen, koska paisuntalenkki vaatii tilaa ja mahdollisesti oman teräsrakenteen tuentaa varten. (Bendapudi 2010b.)

Putkisiltojen suunnittelussa tuulikuormat ovat olennainen osa mitoituksessa huomioonotettavista rasituksista. Putkisilta voidaan suunnitella umpinaisena tai avoimena rakenteena. Umpinaisen rakenteen tuulikuorman laskeminen voidaan toteuttaa suoraviivaisesti standardien määräyksiä noudattaen. Avoimen putkisillan rakenteelle tuulikuormien arvioimisen on haasteellisempaa. Standardit eivät käsittele putkisillan kuormitusta omana kokonaisuutena, vaan rakennesuunnittelijan tulee soveltaa standardien antamia ohjeita. ASCE on toimittanut öljynjalostusteollisuuden rakenteita varten ohjeen tuulikuormien laskemiseksi. Ohjeistuksen lisäksi dokumentti sisältää esimerkkilaskelman putkisilloille ja kaapelihyllyille. (Bailey, Gilbert & Summers 2011, s. 111-122.)

Kaapelihyllyt ovat tärkeä huomioon otettava seikka tuulikuorman arvioimisessa, koska kaapelihyllyt voidaan sijoittaa putkisillan rakenteeseen tuulelle alttiiseen sijaintiin. ASCE:n ja Eurokoodin mukaisissa laskentatavoissa on eroja. Laskentatavat tuottavat eri suuruiset tuulikuormat avoimelle rakenteelle. Eurokoodi tuottaa konservatiivisemmän arvion tuulikuormasta, mutta on monimutkaisempi käyttää. (Lee, Huh, & Lee, 2015, s. 299.)

Kesti (1992) käsittelee kirjassaan teollisuusputkiston suunnittelun haasteita. Putkiston asettamat vaatimukset ovat keskeisiä huomioon otettavia seikkoja putkisillan suunnittelussa. Putkisillan suunnittelun suurin haaste on laajennusvarauksen huomioon ottaminen. Laajennusvarauksen huomioon ottamista ei käsitellä standardeissa, vaan tämä seikka täytyy sopia hankekohtaisesti asiakkaan kanssa. (Kesti 1992, s. 42.)

2 TUTKIMUSMETODIT

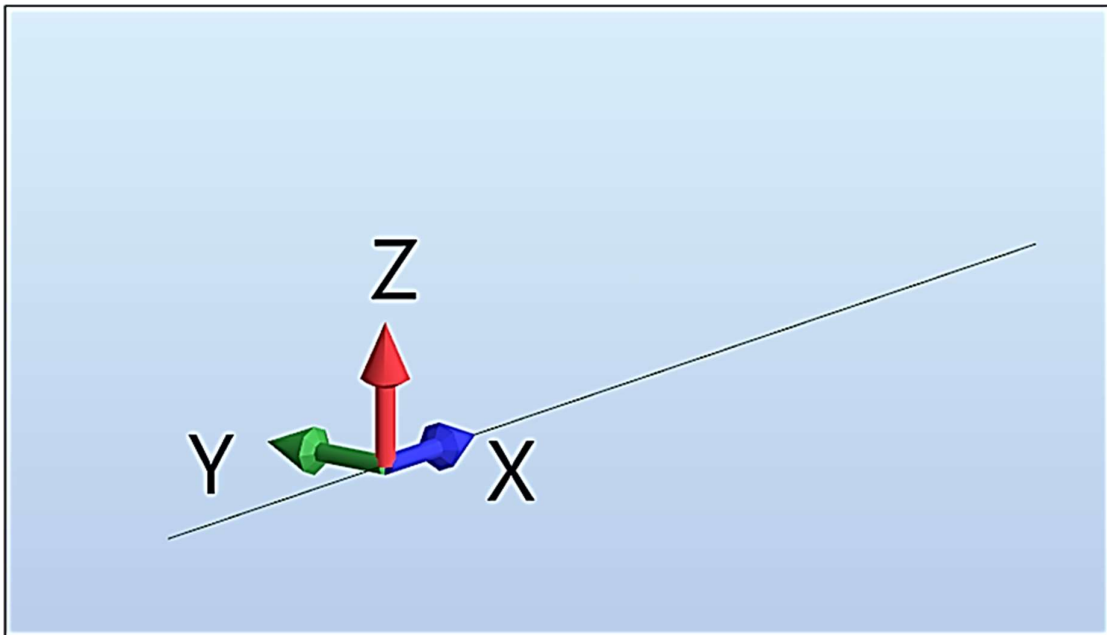
Tutkimukselle on määritelty tutkimuskysymykset, joihin työssä vastataan. Tässä työssä tehtiin kirjallisuuskatsaus, jossa etsittiin putkisiltojen suunnittelua käsittelevää aineistoa. Aineistoina käytettiin tutkimusraportteja, standardeja, yritysten tuoteluetteloja ja tutkimusaiheeseen liittyviä teoksia. Putkisiltoja itsessään ei ole tutkittu kovinkaan paljon. Pääosa tutkimuksesta keskittyy öljynjalostusteollisuuden rakenteiden tutkimiseen. Öljynjalostusteollisuus käyttää paljon ristikko rakenteita prosessien toimintojen tukirakenteissa. Tämä tutkimus painottuu rakennejärjestelmän valitsemiseen siten, ettei ylimitoitusta pääsisi tapahtumaan. Lisäksi tavoitteena on välttää rakennejärjestelmän lukkiutuminen siten, että lämpökuormat pääsevät purkautumaan siltarakenteista, eivätkä aiheuta pakkovoimia siltarakenteeseen. Rakennejärjestelmän lukkiutuminen johtaisi suureen ylimitoitukseen teräsrakenteen ja perustuksen suunnittelussa.

Työssä esitellään tyypillisiä putkistojen tuentaratkaisuja. Kaikkia ratkaisuja ei ole mahdollista esitellä johtuen vaihtoehtojen suuresta määrästä. Putkitukia valmistaa useat yritykset maailmassa, ja jokaisella on omia ratkaisujaan. Tähän työhön valituilla putkiston kannakkeilla pyritään esittelemään suuremman kannakejoukon tyypillisiä ominaisuuksia ja niiden hyödyntämistä. Kannekejoukon ominaisuuksien esittely toimii esitietona rakennesuunnittelijalle. Tämä työ esittelee aihetta muutenkin putkistosuunnittelijan näkökulmasta, jotta rakennesuunnittelijan on helpompi ymmärtää rakenteen vaatimukset.

Putkisiltojen kuormitukset ovat tärkeä aihe ymmärtää, kun rakennejärjestelmää suunnitellaan. Tässä työssä esitetään tärkeimmät huomioon otettavat kuormitukset. Tässä työssä otetaan huomioon valmistuksen ja kokoonpanon piiriin kuuluu konepajalla tapahtuvat toiminnot, rakenteiden kuljetus työmaalle ja nostot paikoilleen.

Tässä työssä käytetään laskentaohjelmistona Autodesk Robot Structural analysis 2021-ohjelmistoa. Ohjelmisto on AFRY Oy:n käyttämä ohjelmisto, joten saman ohjelmiston käyttäminen on perusteltua. Kuva 4 esittää työssä oletettavaa paikalliskoordinaatistoa. Koordinaatistoa käytetään etenkin vapausasteiden määrittämisessä laskentamallin laatimiseksi. Sauvan

aksiaalista suuntaa esittää X-koordinaatti, poikittaista suuntaa Y-koordinaatti, ja pystysuuntaa Z-koordinaatti. Laskentamallin alkuarvaukset muodostetaan laskemalla käyttäen Mathcad Prime 5-ohjelmistoa ja yksinkertaisia laskentakaavoja.



Kuva 4. Autodesk Robot Structural analysis 2021-ohjelmistossa oletettava rakenneosan paikallinen koordinaatisto.

2.1 Tutkimuskysymykset

Tämän työn tutkimuskysymykset ovat esitelty tässä kappaleessa.

Mitkä kuormitukset ja reunaehdot ovat oleellisia putkisillan rakenteen mitoituksessa?

Miten putkisillan ristikkorakenteen geometria määritetään?

Miten valmistus, kuljetus ja kokoonpano vaikuttavat putkisillan suunnitteluun?

2.2 Esimerkkilaskennan lähtötiedot

Tämän työn esimerkkilaskennassa käytetään S355 rakenneterästä materiaalina. S355 on tyyppillinen teräslaatu kantavissa rakenteissa. S355 on yleisesti käytetty ja hyvin tunnettu rakennusmateriaali rakennesuunnittelijoiden keskuudessa.

Esimerkkilaskelmissa käytetään putkiprofiileja ja I-profiileja. Putkiprofiilit ovat SSAB rakenneputkia. I-profiilit noudattavat eurooppalaisia leveälaippaisia poikkileikkauksia HEA tai HEB. Nämä poikkileikkaukset valittiin tähän työhön, koska ne ovat yleisesti käytettyjä. Muitakin poikkileikkauksia olisi mahdollista käyttää, mutta aiherajauksen vuoksi ei käsitelty muita vaihtoehtoja. Putkiprofiilien ja I-profiilien voidaan olettaa sopivan tähän käyttötarkoitukseen. Käytetyt putkiprofiilit ovat kylmämuovattuja rakenneputkia.

Esimerkkilaskennassa tutkitaan sauvojen käyttöasteita, rakenteen kokonaispainoa ja siirtymiä. Rakenteen kokonaispaino vaikuttaa suoraan projektin kustannuksiin, mikä on erityisen oleellinen seikka asiakkaan näkökulmasta. Siirtymät ovat erityisen merkityksellisiä putkiston toiminnalle.

3 PUTKISILTOJEN KUORMITUKSET

Tässä kappaleessa käsitellään putkisiltaan kohdistuvia kuormituksia. Lähdemateriaalina on käytetty standardeja, teollisuuden käytössä olevia suunnitteluohjeita ja muuta kirjallisuutta. Putkisiltojen kuormitukset syntyvät laitoksen käytöstä ja luonnonoloista. Putkiston kuormitusten monimutkaisuudesta johtuen rakennesuunnittelija ja putkistosuunnittelija tekevät runsaasti yhteistyötä.

Rakennesuunnittelijalle geometriavaatimukset ja kuormitukset ilmoitetaan tyypillisesti rakennustehtäväpiirustuksessa. Rakennustehtäväpiirustuksen tulee sisältää vähintään kaikki muut kuormitukset kuin painovoimasta aiheutuvat kuormitukset, mitkä rakenteen tulee kantaa. (PSK 3001 2018, s. 2.)

Putkisillan ensisijainen tarkoitus on kantaa putkiston kuormitukset. Putkiston kuormituksia ovat paino, lämpöliikkeistä johtuvat kiintopistekuormitukset ja liikkeen aikana kosketusvuorovaikutuksesta johtuva kitkavoima. Putkiston tuet ohjaavat kuormitukset putkisillan rakennejärjestelmälle.

Putkiston lisäksi putkisilta kantaa usein laitteita ja kulkutasoja. Aseteltavien laitteistojen kuormitukset annetaan rakennustehtäväpiirustuksessa erikseen tapauskohtaisesti, joten laitteiston kuormitusta ei tuoda esiin tämän tarkemmin tässä kappaleessa. Kulkutasoille kohdistuu tasokuorma huoltohenkilöstöstä.

3.1 Putkista aiheutuvat kuormat

Putkiston paino on putkisillan tuettavista kuormista yleisin. Putkisto tuetaan siten, ettei putken taipuma ylitä standardissa määritettyjä rajoja. Esimerkiksi PSK standardissa on taulukoitu erilaisten putkien suositellut tukivälit. Tukivälit perustuvat putken oman taipuman laskentaan putken ollessa täynnä virtaavaa ainetta. Tukivälien perusteella putkiston aiheuttama kuormitus voidaan arvioida. Putkien tuentojen suunnittelu aloitetaan oman painon huomioon ottamisella. Tuentapisteeseen aiheutuva kuormitus voidaan lasketa kertomalla putken ilmoitettu metripaino PSK 7304 mukaisella putken tuentavälillä. Putken metripaino voidaan las-

kea, kun putken ulkomitat ja seinämävahvuus ovat tiedossa. Putken painoon lisätään virtaavan aineen paino, esimerkiksi veden paino käyttämällä tiheyden arvoa ja putken sisähalkaisijaa. (PSK Käsikirja 8 2019, s. 18.) Veden tiheyden arvoa voidaan käyttää lähes tulkoon aina painon arviointiin, koska putkistolle tehdään vesitäyttökoe. Vesitäyttökokeessa putkiston tiiveys koestetaan. Putkisto täytetään tyypillisesti yksi putki kerrallaan vedellä ja tarkastetaan mahdolliset vuotokohdat. Rakennesuunnittelijan tulee selvittää vesitäyttökokeen järjestelyt putkistosuunnittelijalta. (PIP STC01015 2007, s. 41.)

Putkiston lämpötila muuttuu käytön ja sääolosuhteiden muutosten takia. Lämpötilan muutokset aiheuttavat lämpöliikkeenä joko laajenemista tai kutistumista. Lämpöliikkeet aiheuttavat kuormituksia putkitukiin. Lämmön aiheuttamat vaikutukset tekevät putkitukien suunnittelusta haastavaa, koska lämpöliikkeitä ei voida sitoa jokaisessa tukipisteessä. Lämpöliikkeiden salliminen vähentää putkiston jännityksiä ja putkisiltan kohdistuvia kuormituksia. Putkisto kuitenkin sidotaan putkisuunnittelijan määrittämässä pisteissä, joita kutsutaan kiintopisteiksi. Kiintopisteessä vaikuttaa suuremmat kuormitukset, koska putkiston liike ei ole sallittua. (PSK Käsikirja 8 2019, s. 18.)

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T \quad (1)$$

Putken lämpölaajenemista voidaan arvioida yhtälön (1) avulla, jossa ΔL on lämpöpiteneminen, L_0 putken pituus asennuslämpötilassa, α materiaalin lämpölaajenemiskerroin, ja ΔT tarkasteluhetken lämpötilan ja asennuslämpötilan välinen ero. Yhtälö (1) on voimassa vain putkiston suorilla osuuksilla, mutta auttaa suunnittelijoita arvioimaan lämmöstä aiheutuvia vaatimuksia. (PSK Käsikirja 8 2019, s. 17.)

$$F_k = \mu_k N \quad (2)$$

Putkiston lämpöliike aiheuttaa kitkakuormituksen kosketusvuorovaikutuksen takia. Monissa tukipisteissä putket lepäävät putkitukien päällä, jolloin kosketuksen ja liikkeen esiintyessä syntyy kitkavoima. Kitkakuormituksen suuruus voidaan arvioida käyttäen yhtälöä (2), jossa F_k on kitkavoima, μ_k on kitkakerroin ja N on pystysuuntainen voima. Kitkakertoimen μ_k suuruus määräytyy kontaktipintojen materiaaleista. (Bendapudi 2010b, s. 38.) Esimerkiksi teräs-teräs parille μ_k suuruus on 0,4 (PSK Käsikirja 8 2019, s. 19).

Tarkasteltaessa kitkakuormitusta rakennesuunnittelijan tulee ottaa huomioon kuormitus paikallisessa ja globaalissa tarkastelussa. Globaalin tarkastelun kitkakuormituksena käytetään 50% paikallisen tarkastelun kitkakuormituksen suuruudesta. Kitkakuormitus vaikuttaa putken pituussuunnassa. Samalle tasolle voidaan asettaa useampia putkia. Kitkakuormituksen suuruus ei kasva putkien määrän lisääntyessä täysin samassa suhteessa, koska vierekkäisten putkien kitkakuormitus vaikuttaa eriaikaisesti. Taulukossa 1 on esitetty putkien määrän vaikutus paikallisen kitkakuormituksen suuruuteen. Paikallisella kitkakuormituksella tarkoitetaan samalle kannatinpalkille aseteltavia putkia. (PIP STC01015 2017, s. 18.)

Taulukko 1. PIP ehdottamat kitkakuormien suuruudet paikalliseen laskentaan putkien määrän mukaisesti (PIP STC01015 2017, s. 18).

Putkien määrä tasolla (kpl)	Kitkavoiman suuruus putkien kokonaispainosta (%)
1	40
2 - 3	30
4 - 6	20
> 6	10

Kitkakuormitus on pieni verrattuna kiintopisteiden aiheuttamiin kuormituksiin. Merkittävin vaikutus kitkakuormituksella on putkiston kannatinpalkkien mitoitukseen. Kitkakuormitus vaikuttaa kannatinpalkin poikittaissuunnassa, jolloin kuorma vaikuttaa kannatinpalkin poikkileikkauksen heikommassa suunnassa käytetystä poikkileikkauksen riippuen. Kitkakuormitus vaikuttaa poikkileikkauksen ylä- tai alalaippaan lisäten työmäärää etenkin I-poikkileikkauksen suunnittelussa. (PIP STC01015 2017, s. 19.)

3.2 Tuulikuorma

Putkisiltojen suunnittelussa tuulikuormien arviointi on haasteellista, koska yleensä putkisilta on avoin rakenne. Tällöin tuulikuormat syntyvät rakenteen osista ja putkistosta. Putkistosuunnittelijan tehtäviin kuuluu mitoittaa putkisto tuulen aiheuttamille kuormituksille ja ilmoittaa tuulesta aiheutuva kuormitus rakennustehtäväpiirustuksessa. Rakennesuunnittelija

voi myös pyytää putkistosuunnittelijaa toimittamaan tiedot, mikäli ne puuttuvat.. Rakennesuunnittelija pystyy itse arvioimaan putkistoon kohdistuvan tuulikuorman suuruuden käyttäen standardeja ja teollisuuden ohjeistuksia.

Tuulikuormien laskentaan voidaan käyttää standardeja esimerkiksi eurooppalainen EN-1991-1-4 ja amerikkalainen ASCE-7. Molemmat standardit käsittelevät tuulikuormia rakennuksille ja rakenteille. Putkisiltojen tapauksessa rakennesuunnittelijan tulee soveltaa standardien ohjeita putkisillan tuulikuormien laskemiseksi. ASCE on kuitenkin toimittanut teollisuusalueiden tuulikuormia koskevan erillisen ohjeistuksen. Ohjeistuksessa esitetään esimerkin putkisillan tuulikuorman laskennasta. Eurokoodia käytettäessä rakennesuunnittelijan tulee itse soveltaa standardin ohjeistuksia.

$$F_{w,EC} = c_s c_d c_{f,EC} q_p(z) A_{EC} \quad (3)$$

Eurokoodin mukaan tuulikuorma määritetään yhtälöllä (3), jossa $c_s c_d$ on rakennekerroin, $c_{f,EC}$ on rakenteen tai rakenneosan voimakkeroin, $q_p(z)$ puuskanopeuspaine korkeudella z ja A_{EC} tuulelle altis pinta-ala. (SFS-EN 1991-1-4+A1+AC 2011, s. 44-47.)

Rakennekerroin $c_s c_d$ voidaan määrittää Eurokoodin antamia ohjeistuksia käyttäen, mutta tyypillisesti putkisilta on riittävän jäykkä rakenne Jäykän rakenteen tapauksessa dynaamiset vaikutukset voidaan jättää ottamatta huomioon. Esimerkkinä jäykästä putkisillan rakenteesta on suljettu poikkileikkaus. Tässä tapauksessa on sopivaa valita $c_s c_d$ arvoksi 1,0. (Lee et al 2015, s. 297-299) Rakennekertoimen tarkoitus on ottaa huomioon huippuarvojen eriaikaisuus rakenteen pinnalla, ja turbulenssista aiheutuva rakenteen värähtely. Kun putkisillan poikkileikkaus on avoin, on syytä arvioida alimman ominaisarvo laskemista. Tällöin voidaan harkita muun kuin arvon 1,0 käyttämistä rakennekertoimen arvona. (SFS-EN 1991-1-4 + A1 + AC 2011, s. 48-52.)

$$c_{f,EC} = c_{f0,EC} \psi_\lambda \quad (4)$$

Ristikkorakenteelle voimakerroin $c_{f,EC}$ määritetään yhtälöllä (4), jossa c_{f0} voimakerroin ilman päätevaikutuskerrointa ristikkorakenteille ja telineille, ψ_λ on päätevaikutuskerroin. Päätevaikutuskerrointa tulee käyttää kun ilma pääsee virtaamaan rakenteen tai rakenneosan vapaan pään ohitse. Tällöin vastus pienenee. Päätevaikutuskerroin ψ_λ määritetään hoikkouden ja rakenteen eheyden mukaan. Rakenteen eheys φ on määritelty rakenteen ulkomittojen ja rakenneosien projektioalojen summan suhteena. (SFS-EN 1991-1-4 + A1 + AC 2011, s. 130-135.)

Yksittäiselle putkelle voidaan laskea tuulikuorma käyttäen ympyräsynterinin laskentaan tarkoitettuja laskentaperiaatteita Eurokoodissa. Yhtälö (4) itsessään on samanmuotoinen kuin yhtälö (3). Määrittävät poikkeavat, koska $c_{f0,EC}$ määritetään Reynoldsin luvun perusteella. Eurokoodin taulukoimat arvot perustuvat Reynoldsin lukuihin jotka ovat laskettu puuskanopeuspainetta vastaavalla tuulennopeudella. Voimakertoimen suuruuteen vaikuttaa myös pinnanankarheusmitta, joka on myös taulukoituna Eurokoodiin. (SFS-EN 1991-1-4 + A1 + AC 2011, s. 122-125.)

$$F_{w,ASCE} = c_{f,ASCE} q_z G A_{ASCE} \quad (5)$$

ASCE 7:ssä tuulikuorma on määritelty yhtälöä (5) käyttäen, jossa q_z on tuulenpaine, G on puuskakerroin, A on rakenneosan voimakerroin, tuulelle altis pinta-ala. Voimakertoimelle ASCE:n ohjeistuksessa käytetään arvoa 1,8 tai arvoa 1,6 ensimmäisen rakennetun tason alapuolella ja arvoa 2,0 kaikissa osissa ensimmäisen tason yläpuolella. (Bailey et al. 2011, s. 111.)

Eurokoodissa sallitaan suojauksen hyödyntäminen suunnittelussa. Tilanteissa, joissa kaksi kappaletta ovat peräkkäin, jälkimmäisen kappaleen tuulikuorman voi jättää huomioimatta. Putkisillan rakennejärjestelmä on usein kolmiulotteinen ristikkorakenne, jolloin sauvat voivat suojata toisiaan. Tällöin rakennesuunnittelijan täytyy mitata rakenneosien välimatka toisistaan ja siten määrittää suojakerroin Eurokoodin esittämästä kuvaajasta. (SFS-EN 1991-1-4 + A1 + AC 2011, s. 106-108) ASCE:n ohjeistuksessa sallitaan myös suojauksen vaikutuksen huomioon ottamisen suunnittelussa. (Bailey et al. 2011, s. 67.) Suojausta voidaan hyödyntää etenkin pituussuuntaisen kuormituksen laskennassa.

$$C_{F2} = u C_{F1} \quad (6)$$

Pituussuuntaisen tuulikuorman laskemiseksi voidaan hyödyntää RIL 144:ssä esiteltyjä ohjeita. Putkisilta koostuu pituussuunnassa useista perättäisistä kehistä ja ristikoista. Yhtälössä (6) esitetään perättäisten rakenteiden voimakertoimen laskeminen, missä C_{F1} on tuulenpuoleisen rakenteen voimakerroin, C_{F2} on suojanpuoleisen rakenteen voimakerroin, ja u on rakenteen eheysuhteen, tuulen suuntaa kohtisuoraan olevan leveyden ja rakenteiden keskinäisen välimatkan mukaisesti määritelty kerroin. (RIL 144 1997, s. 43-44.)

3.3 Muut luonnonkuormat

Putkisillan rakenteisiin ja putkistoon voi kertyä lunta ja jäätä. Rakenneosien ja putkiston koko ja eheys vaikuttavat huomioon ottamiseen tarpeeseen. Putkistossa virtaavien aineiden lämpö ehkäisee usein lumen ja jään kertymistä. Kun putkisilta toteutetaan katettuna rakenteena lumen ja jään tuoma lisäkuorma tulee ottaa huomioon. Lumi- ja jääkuormien huomioon ottaminen tulee tehdä hankekohtaisesti. (Walter & Drake 2010, s. 244.)

Putkisilta laajenee lämpötilan muutosten seurauksena. Lämpölaajenemisen arvioimiseen voidaan käyttää yhtälöä (2), joka antaa käsityksen tarvittavasta laajenemisvarasta. Mikäli putkisilta ei pääse vapaasti laajenemaan pituussuunnassa, rakenteeseen aiheutuu puristavia kuormituksia. (Bendapudi 2010a, s. 7.)

Hankekohtaisesti putkisiltojen suunnitteluun vaikuttaa maanjäristysten aiheuttamat kuormitukset. PIPn: toimittama ohjeistus sisältää yksinkertaisen selvityksen huomioon otettavista kuormituksista. ASCE on toimittanut erillisen ohjeen öljynjalostusteollisuuden rakenteiden suunnittelua varten. Erillinen ohje käsittelee öljynjalostusteollisuudessa esiintyvien rakenteiden suunnittelua seismisten kuormitusten alaisissa oloissa. Ohjeistuksen mukaan ASCE 7 standardin ei-rakennusten kuormituksia voidaan soveltaa suoraan putkisiltojen suunnittelussa. (PIP STC01015 2017, s. 15-16.) Tyypillisesti pituussuunnassa putkisillat suunnitellaan ristikoituna rakenteena, ja poikittaissuunnassa kehärakenteena (Soules et al. 2020 s. 238).

3.4 Muut kuormat

Putkisiltaan kohdistuu kuormituksia kuljetuksen, asennuksen ja noston aikana. Putkisillan muihin kuormituksiin voidaan sisällyttää myös epätäydellisyyksistä johtuvat kuormat ja huoltotasojen kuormitukset. Putkisillalle voidaan myös asettaa kulkutasoja huoltoa varten. Kulkutasojen kuormitus määritellään hankekohtaisesti asiakkaan kanssa. Tyypillisesti kulkutasojen kuormitus määrätään standardin perusteella.

Epätarkkuudet otetaan huomioon kehien kokonaisuusanalyyssissä. Perusarvona Eurokoodi antaa 1/200, mitä voidaan vielä pienentää pienennystekijöillä (SFS-EN 1993-1-1 2005, s. 33). Mikäli suunnittelussa halutaan säilyttää konservatiivinen arvio, voidaan pienennyskerroimet jättää laskennasta pois ja käyttää pelkästään perusarvoa.

Bedair (2014, s. 38) määrittelee ohjeistuksen staattisesta mitoituksista kuljetuksen aikaisille kuomille. Kuormitukset koostuvat pysty-, vaaka- ja pituussuuntaisista komponenteista. Komponentit määritellään kuljetettavan rakenteen kokonaisuudessaan mukaan. Taulukko 2 esittää mainittujen komponenttien kertoimien määrittelyt. Kuormitukset sijoitetaan vaikuttamaan rakenteen painopisteeseen. (Bedair 2014, s. 38).

Taulukko 2. Kuljetuksen aikaiset kuormitukset. (Bedair 2014, s. 38)

Kuormitussuunta	Kuormituksen kerroin
Pystysuunta	1.5 – 1.75
Vaakasuunta	0.2 – 0.3
Pituussuuntainen	0.1 – 0.3

Paikoilleen rakennettavan rakenteen suunnittelussa tulee ottaa huomioon standardeissa ilmoitetut asennuksen aikaiset kuormitukset. Paikoilleen nostettavan putkisillan tapauksessa on otettava huomioon noston aikaiset kuormitukset. Molemmissa tapauksissa on otettava huomioon kokoonpanoalueen tai -tilan olosuhteet. Etenkin sääolojen vaikutus voi olla merkittävä rakenteiden toteuttamisen aikana. Kuormat määritellään Eurokoodin osaa EN 1991-1-6 hyödyntäen. Nostettaessa modulaarista rakennetta, on otettava huomioon putkien paino, mikäli putket asetellaan paikoilleen ennen rakenteen nostoa paikoilleen. (Bedair 2014, s. 35.)

Modulaarisen rakenteen nostossa merkittävin kuorma syntyy rakenteen omasta painosta. Rakenteen omapaino koostuu rakenneosista ja valmiiksi asennetuista komponenteista. Nostettaessa kappale on liikkeessä. Kappaleen liikuttamisesta aiheutuu kiihtyvyys. Kappaleeseen vaikuttava kiihtyvyys aiheuttaa hitausvoimia kappaleen massasta johtuen (Työsuojeluhallinto 2009) Hankekohtaisesti voidaan soveltaa lumi- ja jääkuormia noston aikana. Noston olosuhteissa myös tuulikuorman vaikutuksia tulee arvioida hankekohtaisesti. (SFS-EN 1991-1-6 2016, s. 32)

$$W = (D_s + D_e) \gamma_{Load} \gamma_s \gamma_{L+H} \quad (7)$$

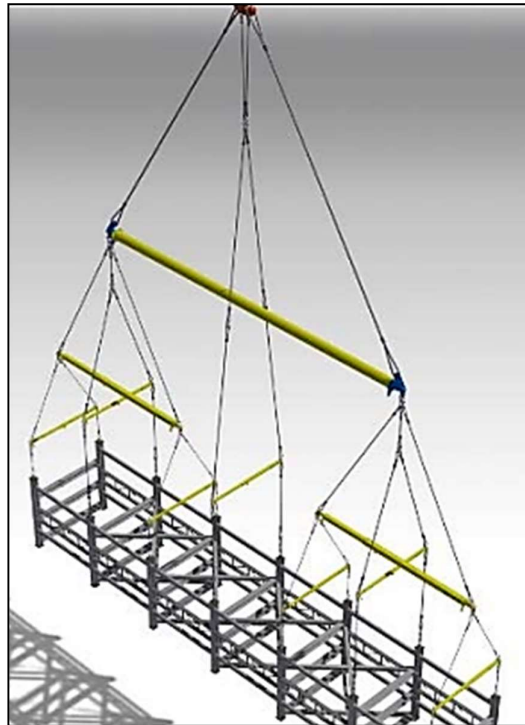
Noston aikaisen kokonaiskuormituksen arviointi voidaan toteuttaa yksinkertaisella kuormitusyhdistelmän tapauksella. Yhdistelmässä otetaan huomioon omapaino ja komponenttien painot. Yhtälö (7) kuvaa noston aikaista kuormaa yhdistelmän muodossa. Yhtälö (7) koostuu rakenteen omasta painosta D_s , komponenttien tyhjästä painosta D_e , varmuuskertoimista γ_{Load} , γ_s ja γ_{L+H} . Kerroin γ_{Load} , on kuormalle asetettava varmuus. Kerroin γ_s on materiaalin varmuus, tässä tapauksessa teräksen varmuuskerroin. Kerroin γ_{L+H} ottaa huomioon noston ja käsittelyn aikaiset dynaamiset vaikutukset. Varmuuskertoimien suuruus on esitetty taulukossa 3. (CEN/TR 15728 2016, s. 11-12.)

Taulukko 3. Noston aikaisen kuormituksen varmuuskertoimet. (CEN/TR 15728 2016, PP 11-12)

Kerroin	Arvo
γ_{Load}	1,35
γ_s	1,25
γ_{L+H}	1,8

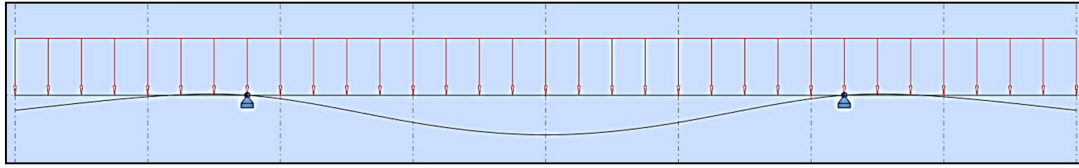
Esimerkiksi putken tyhjä paino voidaan arvioida oleva 40-60% putken käytön aikaisesta painosta, mikäli tarkempaa tietoa ei ole saatavilla (PIP STC01015 2017, s. 10). Kuva 5 esittää tilannetta, jossa on käytetty nostopuomeja suoran noston toteuttamiseksi. Nostopisteitä kuvan 5 tapauksessa on 14. Esimerkkitapauksen nostossa on nostopisteet ovat määritelty moduulin vertikaalisauvojen yläpuolelle. Tällä järjestelyllä nostovoima saadaan suoraan ylös-

päin vaikuttavana voimana. Nostopisteiden määrästä ja asettelusta tulee sopia hankekohtaisesti. (Olearczyk et al. 2015, s. 51.) Olearczyk et al (2015, s.52) esittävät, että noston kuormitukset tulisi ottaa kertoimella 4 huomioon (Olearczyk et. 2015, s. 52).



Kuva 5. Paikoilleen nostettavan moduulin nostojärjestely (Olearczyk et al. 2015, s. 51).

Rakennesuunnittelijan tulee varmistaa, että rakennejärjestelmä pystyy kantamaan noston aikaiset kuormitukset. Nostopisteiden määritys on rakennesuunnittelijan tehtävä (Bedair 2014, s. 35). Neljällä nostopisteellä kuormitus jakautuu mahdollisimman tasaisesti. Avaruusristikon nostopisteiden määrittämiseksi voidaan ensin tarkastella yksinkertaista 2D-tapausta, jossa palkkia kuormitetaan tasaisesti jatkuvalla kuormalla q . Tasaisesti jatkuvalla kuormalla kuvataan rakenteen omaa painoa. Palkki tuetaan yksinkertaisella tuella. Tilanteessa oletetaan myös, että nosto onnistutaan järjestämään suorana nostona. Suoran noston tapauksessa kappaleen omapaino aiheuttaa vain pystysuuntaisen voiman (Olearczyk et al. 2015, s. 50). Nostopisteet optimoidaan siten, että etsitään palkin taivutusmomentin maksimille minimiarvo. Kuva 6 esittää tilannetta, jossa tasainen jatkuva kuorma kuormittaa palkkia. Tasainen jatkuva kuorma korvaa kappaleen omanpainon. Tukiehdoiksi on asetettu nivelellinen tuki. Kuvasta löytyy palkin taipumaviiva, jolla tuodaan esiin rakenteen muodonmuutokset. Nostopisteiden määritys vaikuttaa taipumien suuruuteen.



Kuva 6. Tasaisesti kuormitettu palkki, jolla kuvataan moduulin nostoa.

Kolmiulotteisessa tapauksessa nostopuomeja käyttämällä nostopisteiden kuormitus muuttuu vinosta kuormasta suoraksi ylöspäin vaikuttavaksi kuormaksi. Suuri nostopisteiden määrä lisää tarvittavien nostopuomien määrää. (Olearczyk et al. 2015, s. 50.) Pystysuuntaisella voimalla kuormitettujen nostokorvakkeiden sijainnin optimointi toimii samalla tavalla kuin 2D-tapauksessa. Sopivan sijainnin löydyttyä verrataan saatua sijaintia rakennejärjestelmään. Varsinainen nostokorvake on suotuisinta sijoittaa vertikaalisauvan päälle, koska vertikaalisauvan kohdalle on myös asetettu usein vaakasuuntainen sauva. Tässä tapauksessa nostokorvakkeeseen kohdistuvat vaakavoimat eivät rasita yläpaarten sauvaa. Ristikon sauvojen on tarkoitus kantaa vain aksiaalisia voimia. (Olearczyk et al. 2015, s. 50.)

Onnettomuustilanteiden kuormitukset ovat määriteltävä hankekohtaisesti. Onnettomuustilanteiden kuormitukseen vaikuttavat esimerkiksi putkisillojen sijainti alueella ja putkisillan rakenteen korkeus. Eurokoodin osa EN 1991-1-7 määrittelee onnettomuustilanteiden kuormitukset. (SFS-EN 1991-1-7 +A1 + AC 2014, s. 24.) Putkisillan pilarit tulee suojata törmäyksiltä, ja alituspaikkojen sijainnit merkitä varoitusmerkein (Tukes 2021, s. 19). Törmäysvaaraa ei katsota olevan kun kantava rakenneos on suojattu suojakaiteella, ja rakenneosan ja suojakaiteen väliin jää vähintään 0,6 metrin suuruinen väli. (RIL 144 1997, s. 125.)

3.5 Kuormien yhdistelmät

PIP:n ohjeistuksesta löytyy esimerkki millaisia kuormitusyhdistelmiä putkisillojen suunnittelussa voidaan käyttää. PIP:n ohjeistuksen mukaiset kuormitusyhdistelmät ovat määritelty amerikkalaisen ASCE 7 standardin mukaan. Vastaavat kuormitusyhdistelmät voidaan muodostaa Eurokoodin mukaisesti.

Putkisillan kuormitusyhdistelmien muodostaminen tapahtuu käytännössä samoilla periaatteilla kuin perinteisen teräsrunkoisen rakennuksen tapauksessa. Kuormitusyhdistelmillä pyritään etsimään rakenteen kriittisiä tilanteita. Käyttörajatilassa tutkitaan siirtymiä, jotta putkiston toiminta on mahdollista. Murtorajatilassa tutkitaan rakenteen ja rakenneosien stabiiliutta, sekä rakenneosien lujuutta. Käyttörajatilan ja murtorajatilan kertoimet määritellään hankkeessa noudatettavan standardin mukaisesti. Liitteessä IV on esitetty PIP:n ohjeistuksesta muunnellut kuormitusyhdistelmät, joihin on lisätty hyötykuorma L . (Drake & Walter 2010.)

Kuormitusten yhdistelyssä merkittävä seikka on lämpötilan muutoksista johtuvien kuormitusten ottaminen huomioon. Lämpötilan muutoksista johtuviin kuormituksiin kuuluu kitka-kuormitukset ja auringon paisteen aiheuttama epätasainen rakenteen lämpeneminen. Edellä mainitut kuormitustapaukset ovat muuttuvia kuormituksia. Lämpötila muutoksista johtuvia muuttuvia kuormituksia ei yhdistetä tuuli- ja maanjäristyskuormitusten kanssa. (PIP STC01015 2017, s. 19 – 23.)

4 MUUT VAATIMUKSET

Tässä kappaleessa esitellään putkisiltaan kohdistuvia erityisvaatimuksia, jotka erottavat putkisillat tavanomaisista rakennuksista. Erikoisvaatimukset aiheutuvat kuormituksista, putkistosuunnittelijan vaatimuksista ja mittavaatimuksista. Kuormitusten vaikutus johtuu pääosin lämpötilojen muutoksista, jotka aiheuttavat etenkin putkiston lämpöliikkeen myötä haasteita rakennesuunnittelijalle. Putkistosuunnittelija asettaa vaatimuksia putkisillan geometrialle putkiston tuennan perusteella. Tuennasta syntyvät kuormitukset vaikuttavat rakennejärjestelmän suunnitteluun kiintopisteiden sijoittelun takia. Lämpöliikkeen kompensointi putkiston ominaisuuksia hyödyntäen tehdään paisuntalenkin avulla. Paisuntalenkin läheisyyteen tyypillisesti sijoitetaan putkiston kiintopiste, milloin kuormitukset paisuntalenkin läheisyydessä ovat huomattavan suuret. Mittavaatimukset vaikuttavat pintakäsittelyyn, kuljetuksen ja noston toteuttamiseen.

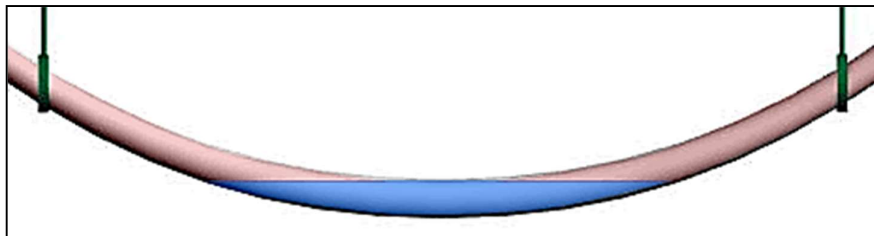
Putkisillan valmistukselliset seikat tuovat omia rajoitteita suunnitteluun. Suurimpana kokonaisuutena on kokoonpanon toteutus. Tämä johtuu siitä, että moduulit voidaan koota konepajalla tai työmaa-alueen kokoonpanoalueella. Konepajalla kokoonpano tuo mukanaan kuljetuksen tuomat rajoitteet. Erilaisilla kuljetusmenetelmillä on maksimimitat, joihin vaikuttavat eniten kuljetukseen liittyvät paikalliset määräykset ja ohjeistukset, sekä kuljetusmenetelmän kantama maksimipaino.

4.1 Siirtymäraajat

Standardit eivät määrittele putkisilloille taipuma- ja siirtymärajoja erikseen. Rakennuksille määriteltyjä rajoja voidaan soveltaa. Esimerkiksi SFS-EN 1993-1-1 kansallisessa liitteessä määriteltyjen raja-arvojen käyttäminen on mahdollista. Putkisillat kuuluvat 'muut rakennukset'-kategoriaan sivusuuntaisia siirtymiä tutkittaessa, ja taipumalle voidaan käyttää pääkannattimille määriteltyjä raja-arvoja. (Ympäristöministeriö 2019, s. 19.) Kirjallisuudesta on mahdollista löytää muitakin raja-arvoja. On kuitenkin todettava, että putkisillan muodonmuutosten raja-arvoihin vaikuttavat eniten putkiston vastaavat raja-arvot. Putkiston vastaavat raja-arvot voiva olla merkittävästi ankarammat. Putkistosuunnittelijan tulee sopia raja-arvot asiakkaan ja rakennesuunnittelijan kanssa. (Bendapudi 2010a, s. 7.) Putkisillan siirtymien raja-arvot ovat hankekohtaiset. Hankekohtaisuuteen vedoten maanjäristystilanteiden

sallitut siirtymät tulisi määrittää tapauskohtaisesti putkistosuunnittelijan, asiakkaan ja rakennesuunnittelijan kesken. (Soules & Johnson & Nisar 2020, s. 218.)

Kuva 7 esittää tilannetta, jossa putkelle on sallittu liian suuri taipuma. Putkessa virtaava aine on jäänyt taipuman aiheuttamaan notkoon paikoilleen. Prosessin toimivuus kärsii virtauksen häiriinnyttyä. (TLV 2017.)



Kuva 7. Putken taipuman havainnollistaminen (TLV 2017).

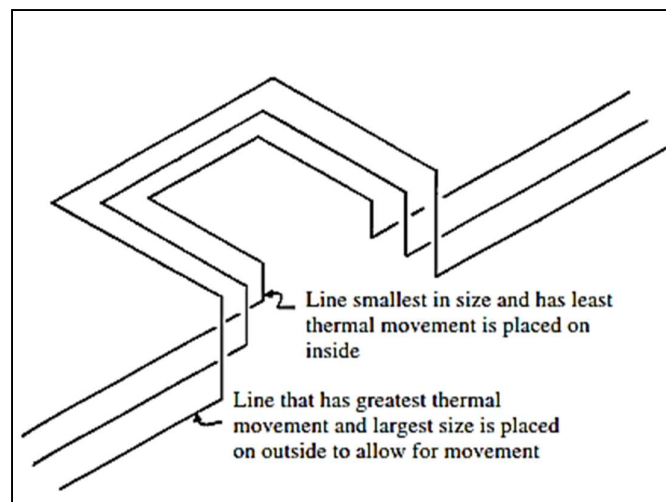
Kuvan 7 mukainen tilanne vältetään putkistosuunnittelijan ja rakennesuunnittelijan välisellä yhteistyöllä. Rakennesuunnittelija suunnittelee ristikon geometrian riittävien putkiston tukien sijoittamisen mahdollistamiseksi.

4.2 Putkiston sijoittelu ja paisuntalenkit

Putkisto sijoitellaan ensisijaisesti prosessien vaatimusten mukaisesti. Raskaimmat putkilinjat sijoitetaan tyypillisesti alemmille tasoille lähelle pilareita. Myös putkilinjat, joissa virtaa syövyttäviä ja vaarallisia aineita, sijoitetaan alemmille tasoille (Tukes 2019, s. 19.). Apu-, huolto- ja kaapelilinjat sijoitetaan putkisillan ylemmille tasoille. Kallistuksen vaativat putkilinjat voidaan tarvittaessa sijoittaa omalle orrelleen. Kallistettuun putkilinjaan voi liittyä putkistosuunnittelijan määrittämiä erikoisvaatimuksia, jotka ovat helpompia toteuttaa omalle orrelleen. (Kesti 1992, PP- 38-39.) Putkiston kallistus voidaan toteuttaa sekundäärikannakkeita hyödyntäen, jolloin putkisillan rakennetta ei tarvitse kallistaa. Putkien kallistus voi olla erisuuntiin tapauskohtaisesti, jolloin kallistus täytyy huolehtia sekundäärikannakkeilla.

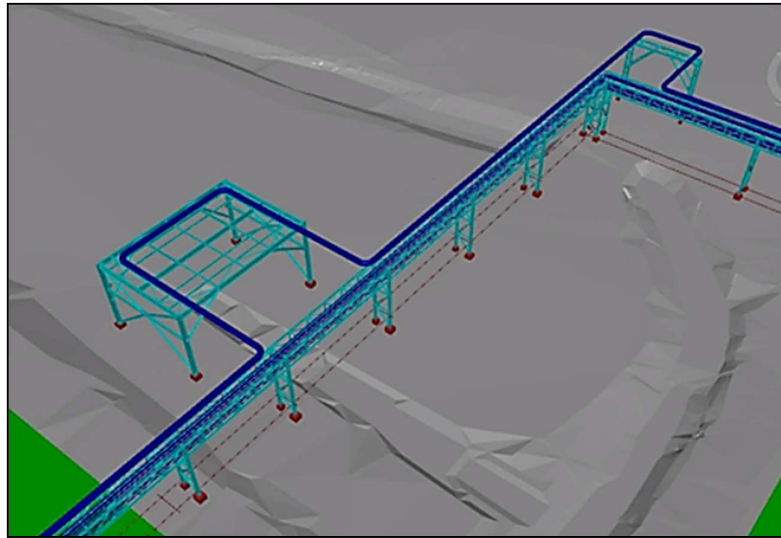
Paisuntalenkeillä on tarkoitus rajoittaa lämpöliikettä siten, että putken omilla ominaisuuksilla putken siirtymää vähennettäisiin. Tarkemmin sanottuna, paisuntalenkkejä käytetään li-

säämään putkiston joustavuutta. (Esoe 2006, s. 78-79.) Paisuntalenkkien oikealla sijoittamisella voidaan vähentää putkituille syntyviä voimia. Paisuntalenkkien muoto on yleisesti U-muoto. Z- ja L-muotoa käytetään myös, mutta ne ovat yleensä lähempänä laitteistoa kuin U-muoto. Kun useat putket vaativat paisuntalenkkiä, putket voidaan ryhmitellä vierekkäin. Vierekkäin ryhmittelemällä suurimman joustavuuden vaativa putki voidaan asettaa tilavimmalle paikalle. Paisuntalenkin ei tarvitse olla yhdessä tasossa, kuten kuvassa 8 esitetään.



Kuva 8. Esimerkki putkiston järjestelystä paisuntalenkkiä varten (Esoe 2006, s. 86).

U-muoto voi vaatia ylimääräisten rakenteiden suunnittelua. U-muoto vaatii usein paljon tilaa, joten rakennesuunnittelijan on tiedettävä minne paisuntalenkki tehdään. Kuva 9 esittää tilannetta, jossa paisuntalenkille on suunniteltu tukeva teräsrakenne. (Sisti 2019.)



Kuva 9. Paisuntalengkki teräsrakenteessa. (Sisti 2019)

Tyypillisesti paisuntalengkkejä sijoitetaan pitkille suorille putkiosuuksille, jossa lämpöliike on suurta putkiston pituudesta johtuen. Paisuntalengkillä muutetaan lämpöliike putken omaksi taivutukseksi. (PSK 7302 2018, s. 11-12.) Putkiston mutkia ja lenkkejä hyödyntämällä lämpöliikettä voidaan kompensoida merkittävästi. (Kesti 1992, s. 121).

4.3 Putkiston tuenta

Putkitukien suunnittelu kuuluu putkistosuunnittelijalle, mutta rakennesuunnittelijan on tärkeä ymmärtää putkitukien toiminta. Tämä auttaa hankkeen alussa, kun lähtötiedot ovat vähäiset ja putkisillan suunnittelua aloitetaan. Tämä kappale käsittelee yleisimpiä putkitukia. Erilaiset putkituet sitovat putken liikettä eri tavoin pituus- ja poikittaissuunnissa. Rakennesuunnittelijalle nämä ovat tärkeitä tietoja kuormien arviointia ja kiintopisteiden määrittämistä varten.

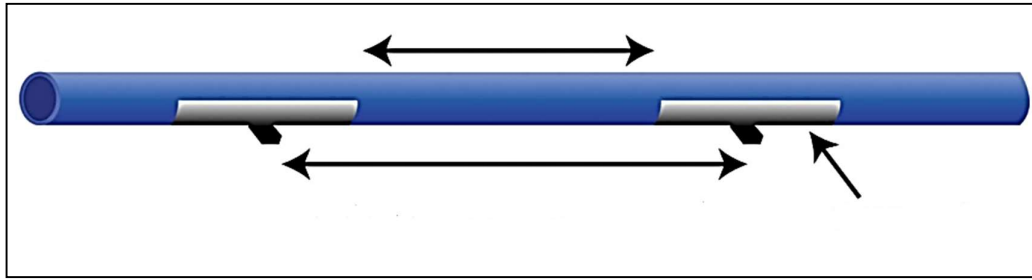
Termillä 'pipe support' tarkoitetaan putken painon tukemiseen käytettyä komponenttia. Vastaavasti termillä 'pipe restraint' tarkoitetaan muuta tukea, jonka tehtävä on estää sekä pitkä- että poikittaissuuntaista liikettä. Yleisesti pyritään aina käyttämään standardoituja komponentteja putkien tuennassa. Tällöin tukien ominaisuudet voidaan lukea taulukosta. Antaki (2003, s. 126) on määrittänyt putkiston tuennan suunnittelulle viisi tavoitetta:

1. Putkiston jännitysten minimointi
2. Säilyttää haluttu reititys ja kallistus

3. Välttää liiallista taipumaa
4. Tukireaktioiden minimointi paikallisesti, laitteiden lähetyillä ja muissa liitoksissa
5. Tukien tyyppin, koon ja sijainnin optimointi. (Antaki 2003, s. 126.)

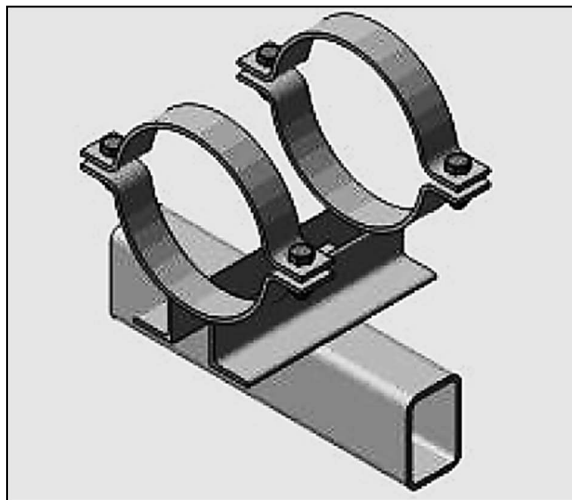
Putkitukien suunnittelussa ensimmäisenä asetetaan tuet putkiston toiminnallisen painon kannattelemiseksi. Standardeista löytyy eri putkille vaaditut tukivälit. Yleisesti tukivälien taulukot perustuvat taivutusvastukseen, koska putkien taipuma vaikuttaa merkittävästi prosessin toimivuuteen. Putkien tuentaa suunnitellessa putki mielletään palkiksi, joka on kuormitettu jatkuvalla kuormalla ja pistekuormilla. Kuormituksilla kuvataan putkiin kohdistuvia kuormituksia. Painoa varten on monia erilaisia tukia. Tämä mahdollistaa erilaisten vapausasteiden sijoittamisen putken tukiin tarpeen mukaan. Jäykän tuen lisäksi putkeen on mahdollista sijoittaa liuku- tai rullatuki. Käyttäen edellä mainittuja reunaehtoja, tukireaktioiden määrittämien palkin statiikkaa hyödyntäen on mahdollista. Tähän voi soveltaa myös taulukoituja tapauksia. (Antaki 2003, s. 126-127.)

Työn liitteisiin on sijoitettu PSK 7304 standardista tyypillisimmät kannakeväli teräspankille, kun tavoitellaan ainoastaan putken painon tukemista. PSK 7304 taulukoista esitetään tiedot DN10 – DN1200 kokoisille putkille sekä eristettyinä ja eristämättöminä. Putkesta on mahdollista valmistaa itsekannattava rakenne. Itsekannattavaa rakennetta hyödynnetään, kun putken kannakeväli ei ole tarpeeksi pitkä eikä muita vaihtoehtoja ole tarjolla riittävän tuen varmistamiseksi. Yleensä tässä tapauksessa putki koostuu kolmesta kerroksesta. Putken sisimmäinen kerros on standardin mukainen putki, minkä päälle toisena kerroksena asetetaan eristekerros. Kolmantena kerroksena asetetaan painoa kannatteleva putki. Mikäli kannatusväli on edelleen liian lyhyt saatavilla olevien tukipisteiden suhteen, on putkea mahdollista jäykistää putken pituussuuntaisilla palkeilla. Tässä tapauksessa kannatinpalkin kohdalle asetetaan putken pituussuuntainen palkki, joka tukee putkea siten, että tuentaväli mittavaa täyttyy. (Kesti 1992, s. 114-115.) Kuva 10 esittää pitkää putkitukea, jolla lyhennetään putken vaatimaa tukiväliä. Harmaa putkituki asetetaan kannatinpalkin kohdalle. Pitkä putkituki tukee putkea pidemmältä matkalta kuin kannatinpalkki on leveä. (Aquatherm 2012.)



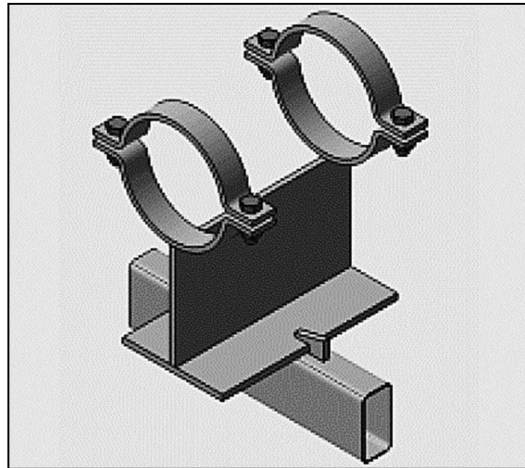
Kuva 10. Esimerkkitapaus pitkistä putkituista, jolloin putkelta vaadittu tukiväli on lyhyempi (Aquatherm 2012).

Kuva 11 esittää tyypillistä liukukannaketta. Liukukannaketta käytetään, kun putki on parempi tukea alhaalta. Liukukannaketta sallii lämpöliikkeen, vaikkakin on mahdollista rajoittaa lämpöliikettä poikittaissuuntaan liukutuen avulla. Liukukannakkeen toiminta perustuu tuen liukumiseen kannatinpalkilla, milloin kontaktipintojen välille aiheutuu kitkavoima. Kitkavoimaa on mahdollista vähentää käyttämällä voideltuja levyjä tai rullatukea. (Smith & van Laan 1987, s. 160-161.)



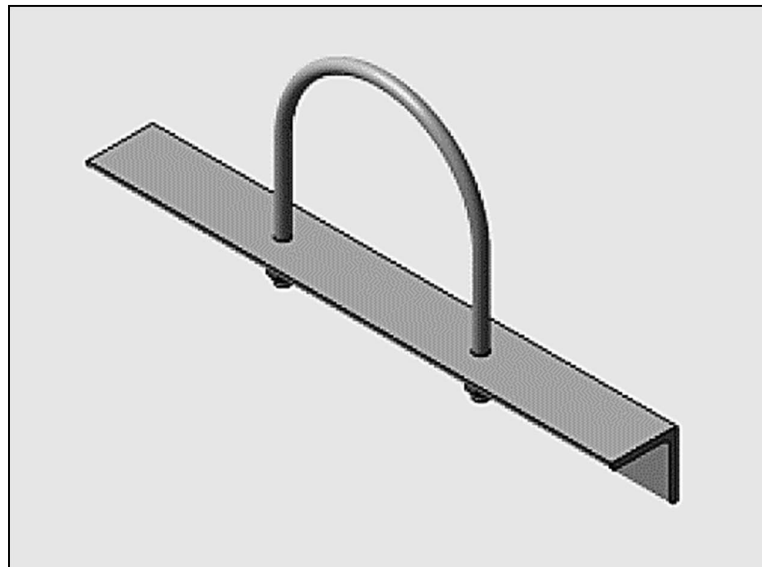
Kuva 11. PSK Käsikirjan esimerkki liukukannakkeesta (PSK Käsikirja 8 2019, S. 34).

Kuva 12 esittää ohjauspistekannaketta. Ohjauspistekannakkeessa on molemmin puolin teräskappaletta, joissa on pienet väkäset estämässä ylöspäin suuntautuvan liikkeen. Teräskappaleilla myös estetään poikittaissuuntainen liike. Ohjauspistekannakkeella on tarkoituksena ohjata lämpöliike haluttuun suuntaan, ja samalla tukea putken painoa. Ohjauspistekannaketta kutsutaan usein kynsiohjaimeksi. (Kesti 1992, s. 111.)



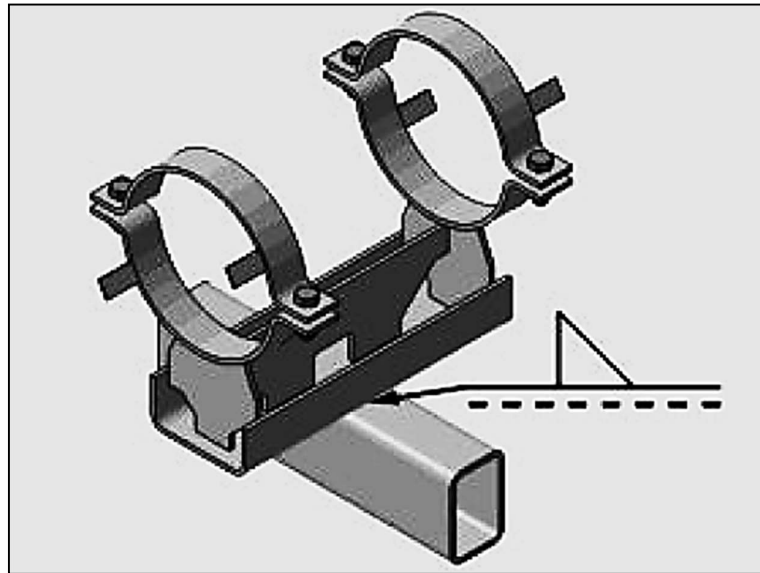
Kuva 12. PSK Käsikirjan esimerkki ohjauspistekannakkeesta (PSK Käsikirja 8 2019, S. 34).

U-sanka on yleinen tapa kiinnittää putki tukevaan rakenteeseen. Kuva 13 on tyypillinen esimerkki U-sangasta. U-sanka ei kannata suuria voimia putken poikittaisessa suunnassa verrattuna muihin tässä työssä esitettyihin kannakkeisiin. Tämän takia U-sankaa käytetään kannattamaan putkia, joiden kuormitus on vähäistä tai itse kiinnitetty palkki pystyy liikkumaan vapaasti poikittaissuunnassa. (Smith & van Laan 1987, s. 177-178.)



Kuva 13. PSK Käsikirjan esimerkki U-sankaohjauksesta (PSK Käsikirja 8 2019, S. 34).

Kuva 14 esittää kiintopistekannaketta. Kiintopistekannakkeella on tarkoitus sitoa kaikki putken liike. Putkisillan suunnittelussa kiintopistekannake on tärkein kannaketyyppi. Kiintopistekannakkeen sijoittaminen on otettava huomioon sillanrakenteessa, koska siihen kohdistuu suurimmat tukireaktiot. Kiintopistekannake sijoitetaan yleensä lähelle komponentteja, jotka voivat vaurioitua putkiston liiallisesta liikkeestä. Kiintopistekannakkeiden välillä putkistosuunnittelijan tulee huolehtia putkiston riittävästä joustosta. Esimerkiksi paisuntalenkki tuottaa riittävän jouston putkeen, jolloin ylimääräisiä pakkovoimia ei pääse putkistoon syntymään. (Kesti 1992, s. 112.)



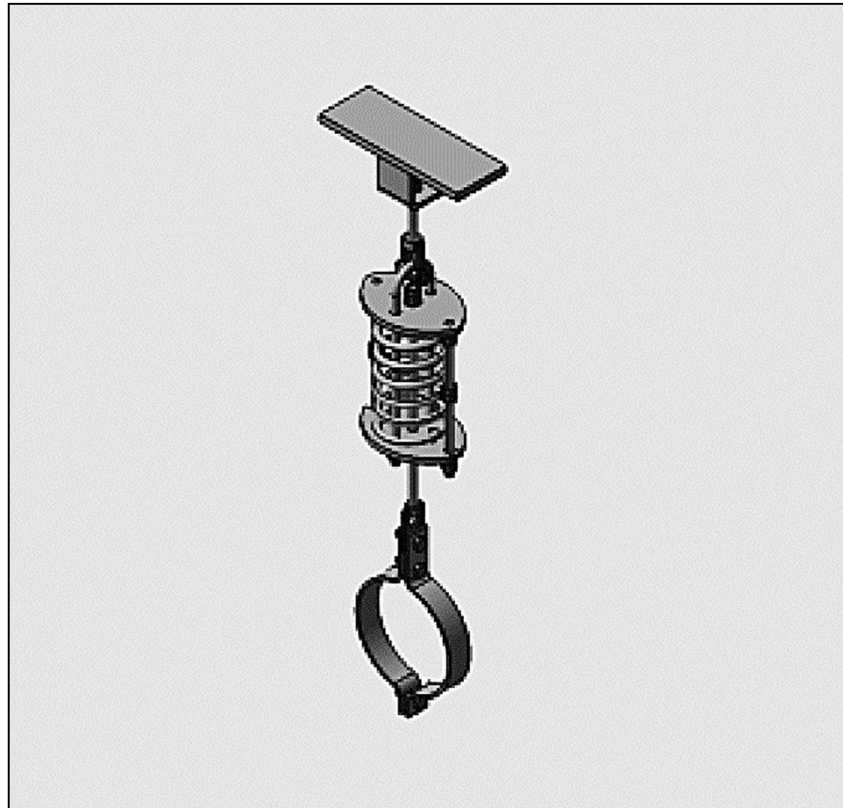
Kuva 14. PSK Käsikirjan esimerkki kiintopistekannakkeesta (PSK Käsikirja 8 2019, S. 35).

Kuva 15 esittää tyypillistä riippukannaketta. Riippukannakkeet kantavat putken painoa sallien esimerkiksi lämpöliikkeen. Ylöspäin suuntautuvan kuormituksen kanssa riippukannake nurjahtaa lähes välittömästi. Lämpöliikkeen riippukannake sallii taipumansa verran. Sallitun siirtymän määrittää yleensä riippukannakkeen valmistaja tai hankkeen määrittelemä sallittu taipuma putkelle. (Smith & van Laan 1987, s. 151.)



Kuva 15. PSK Käsikirjan esimerkki riippukannakkeesta (PSK Käsikirja 8 2019, S. 35).

Kuva 16 esittää tyypillistä jousikannaketta. Jousikannakkeiden erikoisuus on, että ne lukitaan vesitäyttökokeen ajaksi. Jousituet sallivat pituussuuntaisen liikkeen valmistajan määrittelemän rajan mukaisesti. Jousituet yleensä syrjäyttävät riippukannakkeet, kun lämpötilasta johtuvat siirtymät kasvavat suuriksi. (Smith & van Laan 1987, s. 161-165.) Jousikannakkeita käytetään tyypillisesti pystysuuntaisten putkistojen kannatuksessa. Jousella hallitaan lämpötilasta johtuvia kuormituksia. (Kesti 1992, s. 113.) Lukitsemisella tarkoitetaan tilannetta, jossa jousituki toimii kuten riippukannake, eikä jousta normaaliin tapansa. Tämä toimenpide estää odottamattomien kuormitusten syntymisen. Jousikannakkeessa tukivoima määritetään esijännittämällä jousi putkistosuunnittelijan haluamaan jäykkyyteen. Jousikannakkeista on tehty myös vakiovoimakannake, jossa kannattava voima pysyy vakiona. Toimintaperiaate on muuten samanlainen kuin normaalilla jousikannakkeella. (Kesti 1992, s. 114.)



Kuva 16. PSK Käsikirjan esimerkki jousikannakkeesta (PSK Käsikirja 8 2019, S. 36).

4.4 Laajennusvaraus

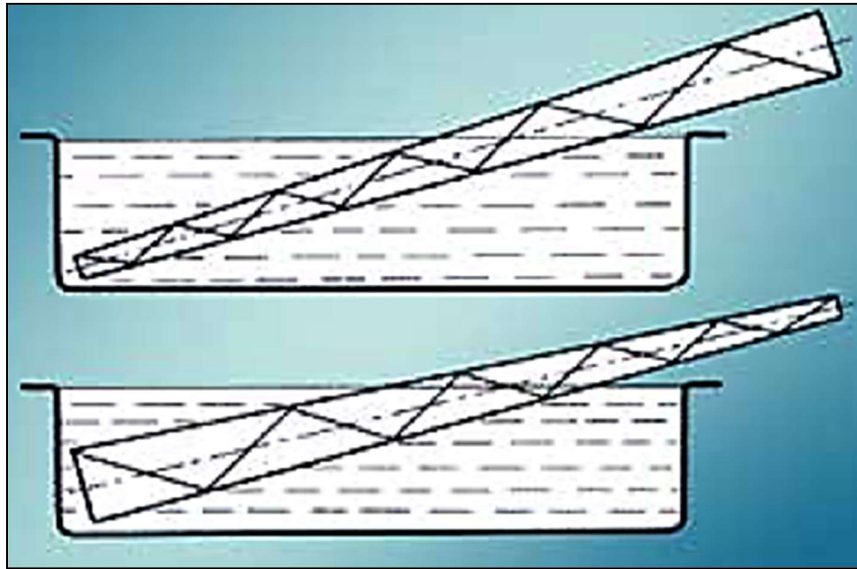
PIP:n ohjeistuksessa esitetään jokaiselle putkisillalle, että laajennuksen ja putkien lisäys tulee olla mahdollista (PIP STC01015 2017, s. 13). Putkisillalle on varattava vähintään 20%:n suuruinen tilavaraus kannatinpalkkia kohden tuleville putkiasennuksille (Kesti 1992, s. 42). Kuvissa 3 ja 4 esitellään putkisilloja, joissa kaapelihyllyt on aseteltu sillan päälle. Luonnollinen tapa laajentaa putkisiltaa on asetella lisättävät putket ja kaapeli putkisillan rakenteen päälle, alle tai sivuille. Rakennesuunnittelijan tulee lisätä olemassa olevaan laskentaan laajennusvarauksesta aiheutuvat kuormitukset. Laajennusvarauksesta tulee sopia asiakkaan kanssa hankekohtaisesti, jotta kuormitukset voidaan arvioida suunnitteluun.

4.5 Pintakäsittelyjen vaikutus rakennesuunnitteluun

Putkisilta toimii tyypillisesti korroosioalttiissa ympäristössä Rakenne suojataan korroosiolta yleensä sinkitsemällä tai maalaamalla. Sinkityn pinnan voi myös maalata. Maalaamalla sinkitty pinta korroosionsuojan kestoikää voidaan lisätä. Maalaamiseen voi myös liittyä esteettiset näkökohdat. (Nordic galvanizers 2020, s. 43.)

Teräsrakenteiden korroosiosuojaukseen käytetään usein on kuumasinkitystä. Muut sinkitysmenetelmät, kuten esimerkiksi elektrolyyttinen sinkitys ja ruiskusinkitys, eivät sovellu putkisillan rakenteiden ja osien sinkitykseen hyvin. Soveltumattomuuteen vaikuttaa menetelmien tuottamien kerrosten paksuus ja laatu, sekä hinta. Muilla menetelmillä on vaikeaa saavuttaa samanlaista korroosiosuojaa kuin kuumasinkityllä menetelmällä. Ruiskusinkitystä käytetään yleensä kummasinkittyjen pintojen vaurioiden ja asennushitsien pinnoittamiseen. Ruiskusinkityksen avulla voidaan saavuttaa sinkkikerros, joka kestää korroosiota yhtä hyvin kuin kuumasinkityksellä valmistettu sinkkikerros. Ruiskusinkityksellä valmistetun kerroksen tulee olla noin 20% paksumpi kuin vastaava kummasinkitty sinkkikerros. Ruiskusinkitys on myös huomattavasti työläämpi menetelmä verrattuna kuumasinkitykseen. (Nordic galvanizers 2020, s. 11-12.)

Kuumasinkityksessä huomioon otettavia seikkoja ovat käytettävien sinkityspatojen mitat, kappaleen kuljetus sinkittäväksi, ja hitsausprosessin valinta. Kuumasinkitys vaatii aina kiinteän laitoksen, jotta prosessi onnistuu. Rakennesuunnittelijan täytyy ottaa huomioon rakenteen kuljetukseen liittyvät määräykset. Sinkityspatojen mitat ovat otettava huomioon, kun suunniteltu rakenne kuumasinkitään kokoonpanon jälkeen. Suuret kappaleet on mahdollista kuumasinkitä käyttäen kääntökastoa. Kuva 17 esittää kääntökaston periaatteita. Rakenne kastetaan kaksi kertaa sinkityspataan. Menetelmä on todettu toimivaksi, mutta kuumasinkityn pinnanlaatu voi kärsiä. Sinkkikerros ei muodostu tasaiseksi koko rakenteeseen, vaan kastojen rajapinnasta tulee epätasainen. Kun rakenne jaetaan pienempiin osiin, rakennesuunnittelijan tulee ottaa huomioon käsittelyn ja kuljetuksen seikat. Käsittely ja kuljetus lisäävät erityisiä kuormitustapauksia laskentaosuuteen. (Nordic galvanizers 2020, s. 26, PSK 2702 2008, s. 4.)



Kuva 17. Kuumasinkitys kääntökastoa käyttäen (Nordic galvanizers 2020, s. 26).

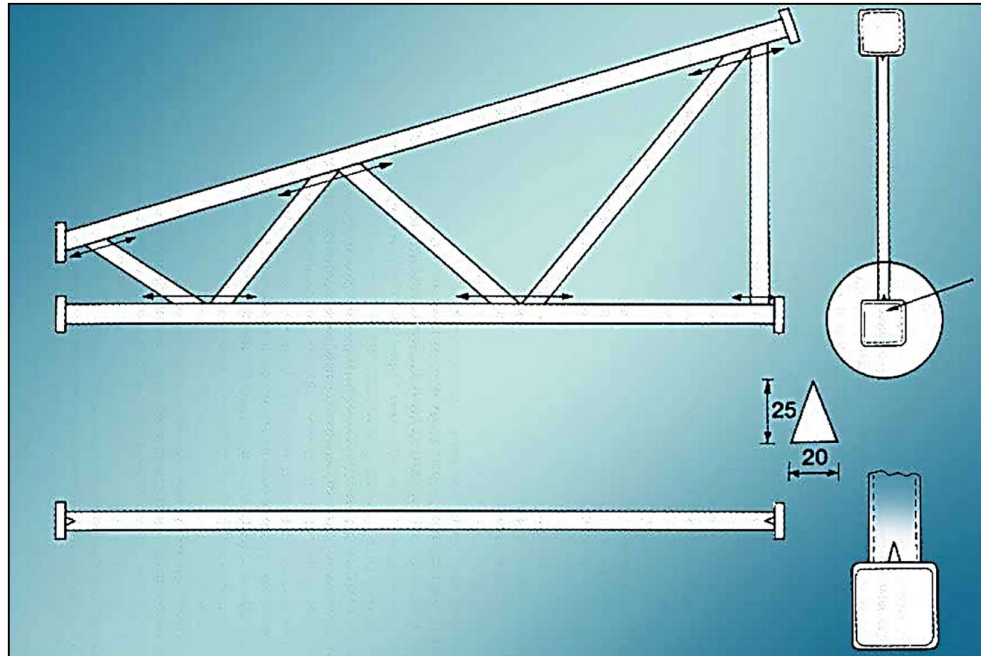
Kuumasinkittyjen rakenteiden hitsaukseen liittyy monia huomionarvoisia seikkoja. Kuumasinkittyjen rakenneosien asennushitsaus rikkoo kuumasinkityn pinnan, jolloin vaurioitunut pinta ja hitsi täytyy päällystää uudelleen. Tässä tapauksessa ruiskusinkitys on toimivampi menetelmä. Hitsausten ja vaurioiden uudelleen päällystys on kuitenkin työlästä ja kallista. (Nordic galvanizers 2020, s. 26.) Sinkkikerros vaikuttaa käytettäviin hitsausparametreihin. Sinkkikerroksen vaikutusta voidaan kumota suurentamalla railoja, vähentämällä hitsausnopeutta, ja hiomalla sinkkikerros pois hitsin alueelta. Pienemmällä hitsausnopeudella sinkkikerros palaa pois teräksen pinnasta ennen kuin hitsisula pääsee kosketukseen sinkin kanssa. Hitsauksen tuottamia roiskeita varten tulisi pintaan suihkuttaa tarkoituksen mukaista ainetta, mikä vähentää roiskeiden tarttuvuutta sinkittyyn pintaan. Tällöin roiskeiden poistaminen ei vaurioita merkittävästi sinkkikerrosta verrattuna käsittelemättömään sinkittyyn pintaan. (Nordic galvanizers 2020, s. 48; Linelli & Langill 1998, s. 2-6.)

Sinkityn pinnan hitsaaminen synnyttää hitsaussavuna sinkkioksidia. Sinkkioksidi on haitallinen, mikä aiheuttaa helposti lyhytaikaisia terveyshaittoja. Hitsaajan tulee käyttää asiaankuuluvia henkilösuojaimia. Hengityssuojain on pakollinen huonosti ilmastoidussa ympäristössä ja ympäristöissä, joissa hitsaussavuja ei saada poistettua hitsaajan hengitysvyöhykkeeltä. (Nordic galvanizers 2020, s. 48; Linelli & Langill 1998, s. 7.) Sinkkioksidin sallitut rajat ovat kuitenkin usein paljon korkeammat kuin monen muun hitsaussavun sallitut rajat

(Työterveyslaitos 2010). Hitsaus tulee suorittaa hankkeessa vallitsevien määräysten ja standardien mukaisesti.

Hitsatun rakenteen kuumasinkityksessä on kiinnitettävä erityistä huomiota hitsien geometriaan. Hitsit sisältävät mahdollisesti huokosia, joihin voi jäädä happoa kuumasinkityksen esikäsittelyistä. Huokosiin kertynyt happo voi aiheuttaa räjähdysvaaran, kun rakenne upotetaan sinkityspataan. Hitseinä tulisi suosia läpi- ja ympärihitsattuja liitoksia (Nordic galvanizers 2020, s. 30.). Esimerkiksi, limittäisliitoksissa rakenteiden väliin jäävä rako voi kerätä happoa, tai sinkki ei pääse tunkeutumaan rakoon. Sinkitsemätön pinta on tällöin altis korroosiolle. Mikäli limittäisliitoksen käyttö on aivan välttämätöntä, rakennesuunnittelijan on vältettävä rakojen jättämistä sinkittävään rakenteeseen tai suunniteltava raosta riittävän suuri. Tällöin sinkki pääsee tunkeutumaan rakoon, ja koko liitos saa korroosiosuojan. (Nordic galvanizers 2020, s.27.)

Varsinkin suljetuista poikkileikkauksista valmistetut rakenteet tulee suunnitella huolellisesti kuumasinkitystä varten. Kuva 18 esittää putkiprofiileista valmistettua ristikkorakennetta, johon on suunniteltu poisto- ja tuuletusaukkoja. Aukkojen tehtävä on mahdollistaa sinkin valuminen poikkileikkauksen sisälle, ja sieltä pois. (Nordic galvanizers 2020, s. 26-28.) SFS-EN ISO 14713-2 käsittelee liitteessä A poisto- ja tuuletusaukkojen sijoittamista rakenteisiin. Standardi velvoittaa rakennesuunnittelijaa välttämään vaikeita geometrioita kuumasinkitysprosessin onnistumiseksi. Standardin taulukko A.2 ohjeistaa suositellut arvot reikien määriille ja halkaisijoille käytettäessä suljettuja poikkileikkauksia rakenteessa. (SFS-EN ISO 14713-2 2020, PP 15-22.)



Kuva 18. Periaatekuva aukkojen sijoittelusta ristikkorakenteessa, sekä ehdotettu aukon geometria 100x100 putkipalkille (Nordic galvanizers 2020, s. 28).

Suomessa sijaitsevien laitosten sinkityspatojen koot vaihtelevat. Esimerkiksi, 13x1,6x2,6 metriä on suurimpia sinkityspatoja, johon voidaan upottaa suurimmillaan 12x1,5x2,4 metriä oleva kappale. Samaan sinkityspataan on mahdollista upottaa kääntökastoa hyödyntäen 12,5x1,5x4,5 metriä oleva kappale. Kappaleen käsittelyä rajoittaa myös nosturista johtuva painorajoite. Esimerkkitapauksen painorajoite on 7000 kg. (Vihdin kuumasinkitys 2021.)

Kuumasinkitty pinta voidaan maalata. Maalauksen tarpeeseen vaikuttaa kappaleen ulkonäön vaatimukset ja käyttö vaativassa ympäristössä. Ulkonäön merkittävin vaatimus on turvallisuusvärien käyttäminen rakenteissa. Kun kappaletta käytetään voimakkaasti syövyttävässä ympäristössä, maalauksella voidaan pidentää kappaleen elinikää ja huoltoväliä. Kappale voi sijaita hankalasti huollettavassa rakenteen kohdassa, jolloin paremmalla korroosion suojalla vähennetään huollon tarvetta. (PSK 2703 2008, s. 5.)

Rakenteiden suunnittelussa maalausta varten tärkeintä on ottaa huomioon luoksepäästävyys. Maalin levittämistä varten tarkoitetut työkalut vaativat tilaa, joka täytyy hankekohtaisesti

määrittää. Standardit sisältävät tyypillisimmät mitat työkaluille. Avoimet kotelo- ja ontelorakenteet tulee varustaa valuma-aukoilla. Suljetut kotelo- ja ontelorakenteet tulee suunnitella ilmaa ja kosteutta läpäisemättömiksi. (SFS-EN ISO 12944-3 2017, s. 10-11.)

4.6 Rakenteen kokoonpanon vaikutus rakennesuunnitteluun

Teräsrakenteen kokoonpanon toteuttamisesta tulee sopia asiakkaan ja muiden vaadittavien osapuolien kesken. Kokoonpanon toteuttamiseen liittyy useita seikkoja, jotka vaikeuttavat suunnittelua ja lisäävät työmäärää suunnittelijalle. Modulaarisessa ratkaisussa materiaalia kuluu arviolta 30% - 50% enemmän verrattuna paikoilleen rakennettuun teräsrakenteeseen. Modulaarisuus kuitenkin luo säästöjä puolestaan työmaalla tehtävässä työssä. Tyypillisesti modulaarisiin ratkaisuihin asennetaan putket ja kaapelihyllyt valmiiksi ennen kuin moduuli asennetaan paikoilleen. Tällä tavoin työmaalla tarvittavat toimet vähenevät ja häiriöitä työmaaliikenteessä voidaan välttää. (Bedair 2014, s. 35.)

Modulaarisen rakenteen nosto tulee suunnitella hankkeessa määriteltyjen määräysten mukaisesti. Modulaarinen rakenne voidaan olettaa avaruusristikoksi noston suunnittelussa. Avaruusristikon tapauksessa nostopisteitä suunnitellaan kolme tai neljä (SKOL ry, s. 6.). Nostopisteisiin mitoitetaan nostokuorman mukaan nostokorvake. Nostokorvakkeen levyn geometria voidaan luonnostella SFS-EN 1993-1-8 kohdan 3.13 mukaan. Nostokorvake voidaan suunnitella niveltappikiinnityksenä. Tämän jälkeen voidaan ottaa huomioon kuorman suunta ja hitsin mitoitus, jolloin levyn muotoa voidaan muuttaa suorasta levystä voiman suuntaiseksi. Tällöin levyn geometriasta tulee tehokkaampi materiaalin käytön suhteen ja hitsin a-mitta voidaan määrittää sopivaksi. Hitsin a-mitta vaikuttaa vaadittavaan railoon ja lämmöntuontiin. Nostokorvakkeen hitsiliitos tulee olla läpihitsattu. Muissa tapauksissa hitsauksessa syntyvä lämpö voi aiheuttaa epäsuotuisia muodonmuutoksia nostokorvakkeen toiminnassa.

Modulaarisen rakenteen hyödyntämisessä täytyy kuitenkin ottaa huomioon kokoonpanon toteutuksen sijainti. Kokoonpano voidaan toteuttaa joko konepajan omissa tiloissa tai hankkeen kokoonpanoalueella. Kun rakenne kootaan konepajan tiloissa, voidaan hyödyntää konepajan olosuhteita. Esimerkiksi sääolosuhteet eivät pääse vaikuttamaan kokoonpanon aikana. Konepajan tiloista vasta ulosvienti altistaa rakenteen sääoloille. Konepajalla kokoonpanon jälkeen nostettava moduuli täytyy kuljettaa hankealueelle nostettavaksi. Kuljetusta

varten on laadittu useita lakeja ja ohjeistuksia. Lait ja ohjeistukset ovat maakohtaisia, ja niistä tulee ottaa selvää ennen hankkeen toimeenpanoa. Kuljetuksen järjestelyyn näillä on suuri vaikutus. Maakohtainen tieliikennelaki voi asettaa ankarammat vaatimukset modulaa-risen rakenteen ulkomitoille kuljetuksen aikana kuin hankkeen muut vaatimukset. (Bedair 2014, s. 35 – 36.)

Kuljetus voi tapahtua teitse, meritse tai ilmäteitä pitkin. Ottaen huomioon putkisiltojen ja hankkeiden sijainnit, voidaan olettaa kuljetusten tapahtuvan ensisijaisesti maanteitä käyt-täen. Mikäli muita kuljetusmuotoja aiotaan käyttää, tulee rakennesuunnittelijalle tuoda tie-toon vaadittavat lait ja ohjeistukset koskien kyseistä kuljetusmenetelmää. Paikoilleen nos-tettavan moduulin tapauksessa on otettava usein huomioon kuljetusmenetelmän rajoitteet. Maantiekuljetusta varten on haettava erikoiskuljetuslupa ja suunniteltava määräysten mu-kaiset järjestelyt. Erikoiskuljetusluvan tarpeeseen vaikuttaa erityisesti ulkomitat ja paino. (Ely-keskus 2010, s. 5-12.) Liitteessä I esitetään ELY-keskuksen periaatekuvia kuljetusten sallituista mitoista ja massoista.

4.7 Tilarajoitukset ja varaukset

Rakennustehtäväpiirustuksen ulkomittoihin vaikuttaa putkisillan sijainti teollisuusalueella ja sijoitettavien putkien määrä ja koko. Lisäksi paikoittain putkisillalla on mahdollisesti vent-tiileitä ja muita kohteita, jonne täytyy varata pääsy- ja huoltomahdollisuus. Näiden näkökoh-tien huomioon ottamiseksi Kesti (1992, s. 35.) on laatinut suosituksia vapaille tiloille. Tau-lukko 4 on esitetty edellä mainitut suositukset. Suositukset ovat niitä tilanteita varten, kun rakennustehtäväpiirustuksessa on esitetty vaaditut toiminnot putkisillalle, ja rakennesuun-nittelija alkaa asetella tarvitsemiaan osia vaatimusten toteuttamista varten. Rakennesuunnit-telijan on otettava huomioon etenkin työtilojen, huoltotilojen ja kulkuteiden vapaa tilat ja vapaa korkeudet ovat tärkeitä. Nämä seikat voivat vaikuttaa profiilien sallittuihin ulkomit-toihin.

Taulukko 4. Ohjeistetut vapaa tilat putkisillan rakenteisiin liittyen (Kesti 1992, s. 35).

Kohde	Vapaa tila (mm)
Työtila laitteen ympärillä	800
Työtila pumpun ympärillä	800 ... 1000
Työtila kompressorin ympärillä	1200
Työtila ruuvi siirtimen ympärillä	1000
Kulkutie putkien välissä	800
Kulkutie yleisesti	800
Portaiden leveys	800
Hoitotaso	2000

Taulukko 5 vastaavasti esittää Kestin (1992, s. 35.) ehdottamat vapaa korkeudet putkisillan rakenteille. Etenkin maanteiden ja rautateiden lähettyvillä vapaa korkeuden mitat ovat erittäin tärkeitä, koska vapaa korkeus vaikuttaa voimakkaasti hankkeessa huomioon otaviin onnettomuuskuormituksiin.

Taulukko 5. Ohjeistetut vapaa korkeuden mitat putkisillan rakenteisiin liittyen (Kesti 1992, s. 35).

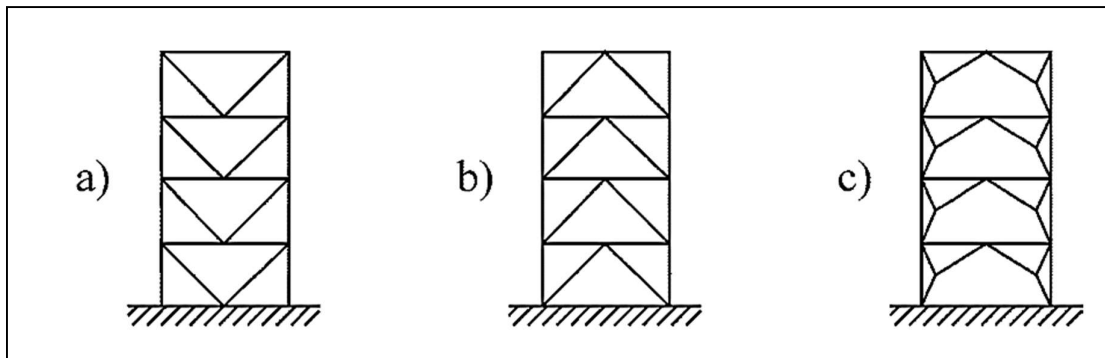
Kohde	Vapaa korkeus (mm)
Hoitotasoilla	2100 ... 2200
Maanpinnalla	2500
Tiet	Vapaa tila (mm)
Päätien vapaa korkeus	5000
Sivutien vapaa korkeus	4000
Rautatiet	
Vapaa korkeus kiskon pinnasta	5600
Leveys radan keskeltä lähimpään kohteeseen	2500

Putkisiltojen perustusten tulisi ylittää vähintään 300 mm maanpinnan yläpuolelle (Kesti 1992, s. 36).

4.8 Maanjäristysten huomioon ottaminen suunnittelussa

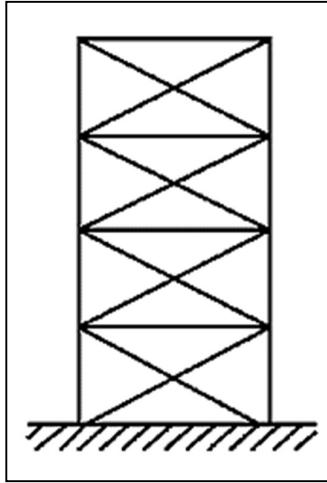
Putkisiltoja suunniteltaessa maanjäristysten huomioon ottaminen tuo rakennejärjestelmään vaatimuksia. Vaatimukset koskevat erityisesti liitosten ja jäykistyksen toteuttamista. Putkisillan rakenteen jäykistys maanjäristystilanteissa vaatii rakennesuunnittelijalta huolellista perehtymistä standardiin. Putkisillan pilarit muodostavat tyypillisesti kahden tai neljän pilarin rakenteen, mikä voidaan usein jäykistää ristikoimalla rakenne. Maanjäristystilanteissa rakenteisiin suunnitellaan alueita, joissa plastinen muodonmuutos sallitaan suurempien vaihinkojen välttämiseksi. Etenkin ristikoiden nivelliitoksissa liitosten riittävästä kiertymiskyvystä tulee huolehtia. (Kullaa & Leino & Kämä 1998, s. 45.)

Eurokoodi 8:ssa määritellään rakenteiden suunnittelua maanjäristystilanteessa. Standardi antaa vaihtoehtoja jäykistysjärjestelmän toteuttamista varten. Kuva 19 esittää Eurokoodi 8:n määrittämiä jäykistysjärjestelmiä kehille, joiden tulee kantaa maanjäristystilanteiden kuormituksia. (SFS-EN 1998-1 2005, s. 144.)



Kuva 19. Eurokoodi 8:n määrittämiä jäykistysjärjestelmiä maanjäristystilanteisiin (SFS-EN 1998-1 2005, s. 144).

Kuva 20 esittää Eurokoodi 8 mukaista jäykistysjärjestelmää maanjäristystilanteisiin. Kuvien 19 ja 20 mukaiset jäykistysjärjestelmät sopivat putkisiltojen jalkojen jäykistämiseen maanjäristystilanteissa. Rakennesuunnittelijan tehtäväksi jää valita sopiva jäykistysjärjestelmä. Valintaan vaikuttaa voimakkaasti erilaiset tilavaraukset. Esimerkiksi ajoneuvon kulku pilarien välissä tulee olla mahdollista. (Soules et al. 2020, s. 236-237.)



Kuva 20. Eurokoodi 8:n määrittämä jäykistysjärjestelmä maanjäristystilanteisiin (SFS-EN 1998-1 2005, s. 143).

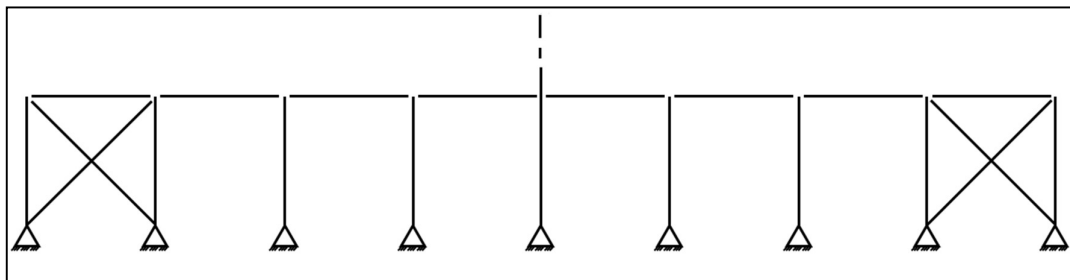
Muitakin jäykistysjärjestelmiä on mahdollista suunnitella, mutta plastisen nivelen syntymisen hallinta on haastavampaa. Kuvien 19 ja 20 järjestelmät ovat keskeisillä vinositeillä jäykistettyjä kehiä. Kullaa et al. (1998 s. 40) kuvailevat esitettyjen järjestelmien suunnittelun olevan haastavaa. Esitettyjen järjestelmien lisäksi olisi mahdollista suunnitella K-siteistä koottu jäykistysjärjestelmä. K-siteistä koostuvaa järjestelmää olisi kuitenkin syytä välttää, koska pilariin voi muodostua plastinen alue, mikä ei ole sallittua. (Kullaa et al. 1998, s. 40.)

Amerikkalaisissa ASCE standardeissa määritellään vastaavanlaiset jäykistysjärjestelmät kuin Eurokoodi 8:ssa. Seismisen aktiivisuuden alueilla ohjeistetaan käytettäväksi kuvan 20 jäykistysjärjestelmää. X- jäykitys kantaa hyvin maanjäristyksestä aiheutuvia kuormituksia verrattuna muihin vaihtoehtoihin. Mikäli maanjäristysten kuormituksia ei tarvitse huomioida, muilla jäykistysjärjestelmillä voidaan suunnitella tehokkaampia rakenteita. (Soules et al. 2020, s. 236-237.)

5 RAKENNEJÄRJESTELMÄN PÄÄMITAT

Tämä kappale esittelee putkisiltojen päämittojen päättämistä. Kuormitukset ja hankealueen suunnittelu ohjaavat näitä seikkoja merkittävästi. Rakenteet ulkomitat määritetään rakennustehtäväpiirustuksessa. Teollisuuslaitoksen esisuunnittelussa määritetään ulkomitat putkisillalle, joiden rajoissa putkisto- ja rakennesuunnittelija rakenteen ja putkiston suunnittelevat. Rakennesuunnittelijan täytyy tuottaa rakennejärjestelmän ratkaisu, johon putkistosuunnittelija voi tukea putkiston. Vastavuoroisesti putkistosuunnittelijan täytyy asetella putkiston tuet siten, että tukireaktiot ovat mahdollisia kantaa rakennejärjestelmällä.

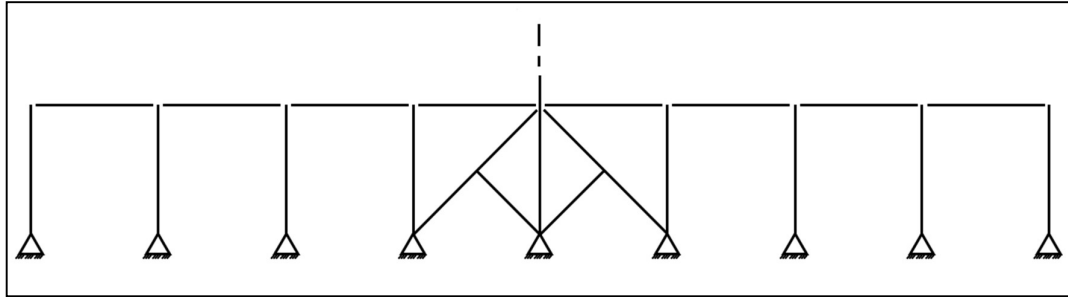
Rakennejärjestelmän laatimisessa on tärkeää ottaa huomioon putkisillan pituussuuntaiset lämpöliikkeet. Lämpöliikkeet eivät kohdistu putkisiltaan suuria kuormituksia, jos rakennejärjestelmä sallii pituussuuntaisen liikkeen. Kuva 21 esittää tilannetta, jossa putkisilta on jäykistetty molemmista päistään. Putkisillan lämpöliikkeet ovat estetyt, ja rakennejärjestelmän kohdistuu lämpöliikkeiden aiheuttamia kuormia. Aiheutuneet kuormat ovat ei toivotuja, mitkä muiden kuormitusten yhteisvaikutuksesta aiheuttavat vaurioita putkistolle tai putkisillan rakenteelle. (Bendapudi 2010a, s. 6.)



Kuva 21. Tyypillinen esimerkki lukkiutuvasta rakennejärjestelmästä (Bendapudi 2010a, s. 6).

Kuvassa 22 esitetään putkisillan lohkoa, jossa jäykistys on symmetrisesti lohkon keskellä. Tilanteessa lämpöliikkeet voivat tapahtua putkisillan vapaissa päissä, eikä rakennejärjestelmään kohdistu ylimääräisiä kuormituksia. Pilareille on sallittu pituussuuntainen siirtymä hankkeessa määriteltyjen rajojen mukaisesti. Kuvan 22 rakennejärjestelmä hyödyntää sallit-

tua siirtymää. Toinen merkittävä tapa huolehtia pituussuuntaisista siirtymistä on käyttää soikeita reikiä. Reikien pituudeksi voi määrittää putkisillan jännevälin arvioidun lämpöpitenevän mittaiseksi. (Bendapudi 2010a, s. 7.)



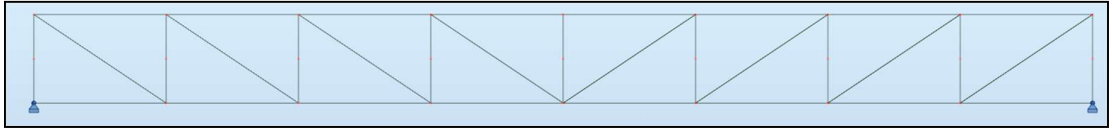
Kuva 22. Esimerkki lukkiutumattomasta jäykistysjärjestelmästä (Bendapudi 2010a, s. 6).

5.1 Putkisillan rakennejärjestelmän muodon määrittäminen

Pääasiallisesti moduulin mitoista vaaditut ulkomitat ovat määriteltyjä, jolloin paarteiden ja kannatinpalkkien paikat ovat ennalta määrätty. Rakennesuunnittelijan tehtäväksi jää ristikon sauvojen mitoitus, ja ristikon geometrian päättäminen. Ristikon geometriaan vaikuttaa kuitenkin vaadittavien putkien tuentojen sijoittaminen.

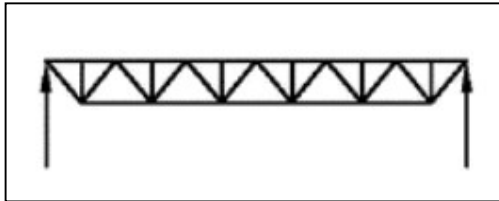
Ristikoiden geometrioista yleisimmin käytetään modifioitua Warren ristikkkoa ja Pratt ristikkkoa. Muitakin ristikkotyyppejä käytetään, mutta kaksi mainittua ristikkotyyppiä löytyvät useista kohteista. Tästä syystä voidaan olettaa, että edellä mainitut ristikkotyypit ovat yleisiä putkisiltojen rakennejärjestelmissä. Ristikkotyyppien sopivuuden voi myös perustella vertikaalisauvojen sopivalla sijoittelulla. Vertikaalisauvoihin on mahdollista liittää putkiston vaatimat kannatinpalkit. Ristikkotyypin valintaan vaikuttaa voimakkaasti suunnittelijan oma kokemus.

Kuva 23 esittää Pratt-ristikon perusgeometriaa. Pratt-ristikko on keskilinjansa suhteen peilikuva. Diagonaalisauvat ovat pystysuuntaisen kuormituksen vallitessa vetosauvoina, ja vertikaalisauvat puristussauvoina. (Davison & Owens 2011, s. 600.)



Kuva 23. Pratt-ristikon perusgeometria (Davison & Owens 2011, s. 601, muok.).

Kuva 24 esittää modifioidun Warren-ristikon perusgeometriaa. Modifioidussa Warren ristikossa on lisätty vertikaalisauvoja diagonaalisauvojen väliin. Warren ristikon eduksi voidaan katsoa esteettisyys. Mikäli Warren ristikon perustapausta ilman vertikaalisauvoja voidaan käyttää rakenteessa, materiaalin käyttö Pratt-ristikkoon verrattuna on pienempi. Myös modifioidussa Warren ristikossa materiaalia kuluu vähemmän kuin Pratt-ristikossa. (Davison & Owens 2011, s. 601-602.)



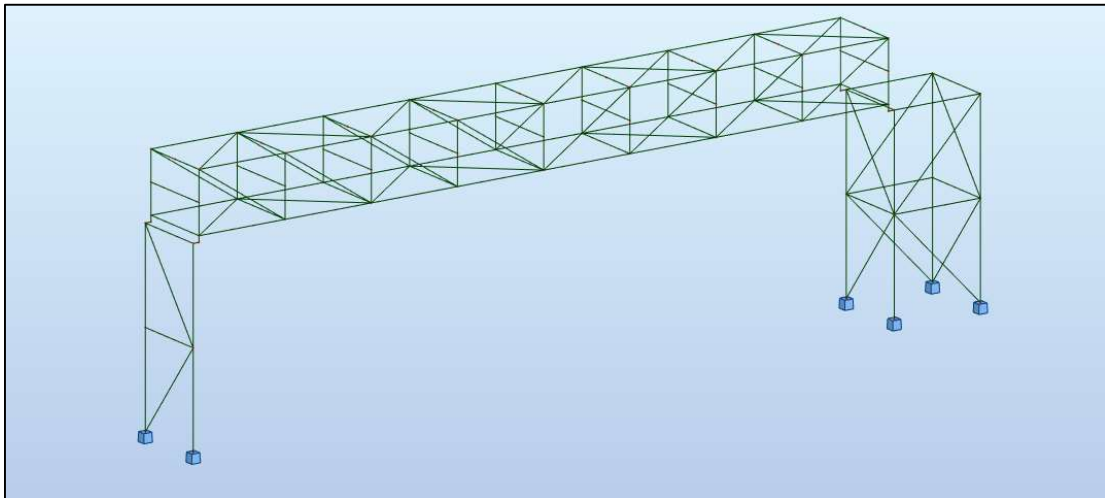
Kuva 24. Modifioidun Warren ristikon perusgeometria (Davison & Owens 2011, s. 601, muok.).

Moduulin pituus määräytyy pilareiden sijainnin perusteella. Teollisuusalueella on rajoitteet, minne pilareita voidaan sijoittaa. Rajoitteet ilmoitetaan rakennesuunnittelijalle esitietona. Esimerkiksi kulkuväylät ja muut rakenteet voivat estää paikoittain identtisten mittojen säilyttämisen läpi putkisillan pituuden. Mikäli jokaisen moduulin pituus ei rajoitteista johtuen pysy samanlaisena, on tärkeää säilyttää moduulin symmetrisyys moduulin puolivälin suhteen.

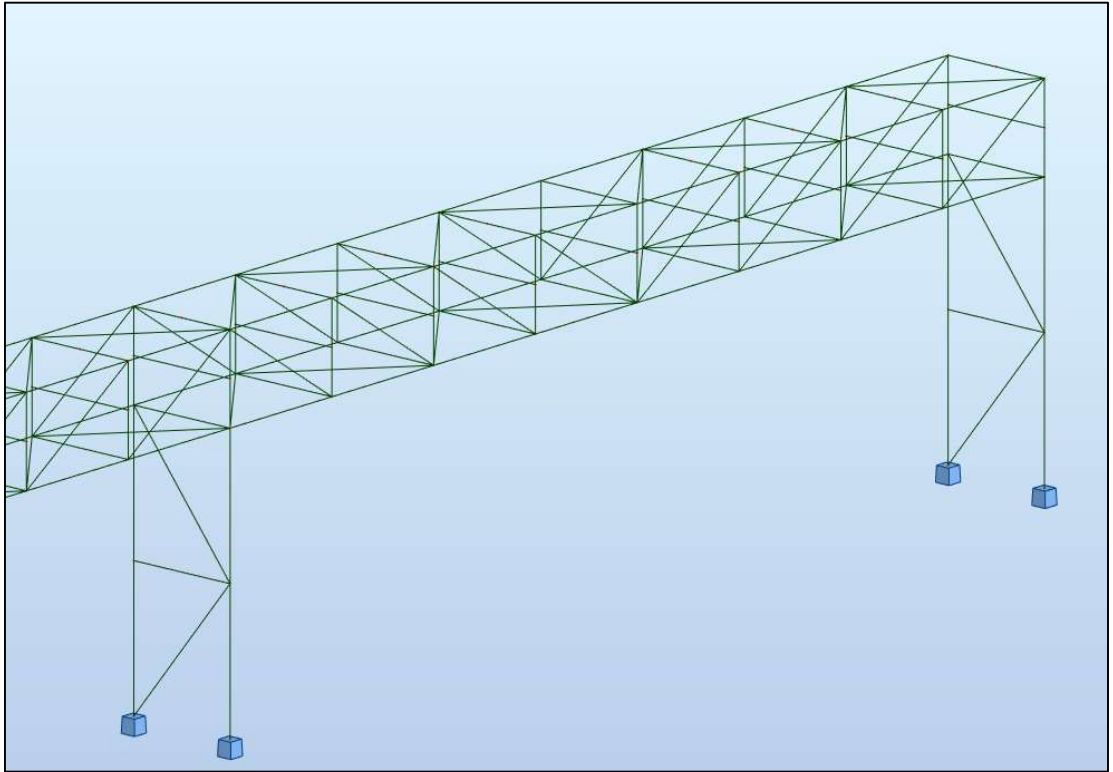
6 LASKENTAMALLI PUTKISILLALLE

Tämä kappale esittelee luotuja laskentamalleja, joiden avulla perustellaan aikaisemmin esiteltyjä asioita ja vertaillaan modifioidun Warren ristikon ja Pratt ristikon ominaisuuksia. Lisäksi tutkitaan, paikoilleen rakennetun ja paikoilleen nostetun moduulin eroja laskennan kautta. Erityisesti kokonaismassat kiinnostavat, koska asiakasta kiinnostaa eritoten materiaalikustannukset. Rakennesuunnittelijalla on suuri vaikutus valinnoillaan materiaalikustannuksiin.

Kuvassa 25 esittää laskentamallia paikoilleen nostettavalle moduulille. Moduuli on muodostettu Pratt-ristikosta, jossa vertikaalisauvat ovat 3 metrin välein. Moduulin pituus on 24 metriä, leveys 2,5 metriä ja korkeus 2 metriä. Putkiston kannatinpalkit ovat asetettu vertikaalisauvojen kohdalle ja tasojäykisteet ovat asetettu vinosauvoilla. Keskimmäinen kannatinpalkki on asetettu 1 metrin korkeudelle alimmasta kannatinpalkista mitaten. Tasoristikko noudattaa modifioidun Warren-ristikon geometriaa.



Kuva 25. Modulaarinen rakennejärjestelmä Pratt-ristikon geometrialla.



Kuva 26. Paikoilleen rakennettu rakenne laskentamallissa.

Esimerkilaskennan kuormituksena asetetaan tasaisesti jakautuneena viivakuormituksena. Tuulikuorma asetetaan viivakuormana jokaiselle vertikaalisauvalle. Putkiston kuormitus asetetaan viivakuormituksena kannatinpalkeille. Tällä tavoin laskentamalli säilyy siistinä ja helppolukuisena.

Tämän työn laskentamallissa pilarit ovat tuettu jäykästi perustuksiin. Muut vapausasteet sauvuille ovat esitetty taulukossa 6. Diagonaalisauvojen ominaisuuksiin on puolestaan asetettu ehto, joka sallii sauvalle vain aksiaalisen kuormituksen. Ristikon paarteen vapautus pätee myös paikoilleen rakennettavan rakenteen tapauksessa, silloin putkisillan pilarit toimivat päätykehänä.

Taulukko 6. Laskentamalleihin asetetut vapausasteet.

Rakennejärjestelmän osa	Vapausasteet sauvassa
Pilareiden jäykisteet	Nivel -Nivel
Pilareiden yläpäiden palkit	Kiertymät vapautettu paikallisen y- ja z-akselin ympäri palkin molemmista päistä
Moduulin tukipalkki	Jäykästi tuettu palkki
Moduulien päätykehä (MI kaikki osat kehässä)	Jäykästi tuettu palkki
Putkiston kannatin palkit	Kiertymät vapautettu paikallisen y- ja z-akselin ympäri palkin molemmista päistä
Ristikon kaikki sauvat	Nivel – Nivel
Moduulin ja jalkarakenteen liitos	Kiertymät vapautettu paikallisen y- ja z-akselin ympäri
Paarteen liitos päätykehään	Kiertymät vapautettu paikallisen y- ja z-akselin ympäri

Laskentamalliin profiilien poikkileikkausten alkuarvaukset saadaan ristikolle käyttämällä palkkianalogiaa. Ajatellaan ensiksi ristikko yksinkertaisesti tuettuna palkkina. Tilanteen palkkia kuormittaa putkistosta aiheutuva kuormitus. Putkiston kuormitus ja sijainti tunnetaan ennen suunnittelun alkua. Lisäksi vaaditut ulkomitat ovat tiedossa. Tällä tavoin ristikon muoto, etenkin vertikaalisauvojen sijainti, on ennalta määrätty. Palkkianalogian mukaisesti palkkia kuormittava maksimimomentti määrää puristetun paarteen poikkileikkauksen ja leikkausvoiman maksimi määrää uumasauvojen poikkileikkauksen. (Ongelin & Valkonen 2012, s. 420-422.)

Kannatinpalkit mitoitetaan sovitun käyttörajatilan taipumarajan mukaisesti alkuarvausta varten. Ristikoiden väliin sijoitettavien jäykisteiden poikkileikkauksena voidaan käyttää samaa poikkileikkausta kuin ristikoiden sauvissa. Kun rakenteen sauvojen poikkileikkaukset saadaan tarkastettua, voidaan poikkileikkauksia optimoida teräsmenekin vähentämiseksi. Ristikon laskennan jälkeen analyysistä saadaan tuloksena pilareihin kohdistuvat rasitukset. Pilareiden alkuarvauksen voi muodostaa esimerkiksi käyttämällä suurinta puristavaa kuormitusta. Nurjahduspituutena voidaan aluksi käyttää koko pilarin mitta. Tällä tavoin saadaan

konservatiivinen arvio. Tyypillisesti pilarit muodostavat kehän tai tornin, mikä toimii putkisillan jalkarakenteena. Pilarit voidaan yhdistää toisiinsa pelkillä palkeilla tai ristikoimalla.

6.1 Lähtötiedot

Tässä työssä käytetään seuraavia lähtötietoja laskentamallin laatimisessa. Mitat ja arvot perustuvat aikaisempiin suunnittelukokemuksiin ja kirjallisuus katsauksen arvoihin.

- Ei lumikuormia, koska rakennetta ei ole katettu. Tässä tapauksessa voidaan olettaa, ettei lunta ja jäätä kerry merkittävästi rakenteisiin.
- Ei maanjäristyskuormia
- Avoin rakenne kaikilta sivuilta
- Moduuliväli on 24 metriä, koko putkisillan mitan ollessa 147 metriä. Järjestelmässä on yksi neljän pilarin muodostama torni. Tornin leveys on putkisillan leveyden mittainen ja pituus on kolme metriä. Tornin korkeus on sama kuin putkisillan muiden osien korkeus. Putkisilta koostuu siis kuudesta 24 metriä pitkstä moduulista ja yhdestä tornista.
- Putkisto on tuettava kolmen metrin välein. Tyypillinen tuentaväli DN50 kokoiselle putkelle vapaalla tukiehdolla on 2,9 metriä, mutta käytetään tasalukua yksinkertaisuuden nimessä. Kuten aiemmin todettu tässä työssä todellinen vaadittu tukiväli on jäykän ja vapaan tuentatavan välissä. Jäykällä tukiehdolla tukiväliksi saadaan 4,9 metriä. Putkiston kuormitus on puolestaan määritelty DN200 kokoisen putken mukaan, joka vaatii tuennan 6,2 metrin välin, kun käytetään vapaata tukiehtoa.
- Putkisillan pilarin on oltava 6,3 metriä korkea, koska teollisuusalueen järjestelyt niin vaativat. Perustuksen yläpinta on maanpinnan yläpuolella siten, että pilarin yläpinta on seitsemän metrin korkeudessa.
- Putkiston kuormitus on PIP mukainen 2 kN/m^2 tasaisesti jakautunut kuormitus. Tämä kuormitus vastaa DN200 kokoisia putkia, jotka ovat aseteltu 375 mm välein toisistaan ja täytetty vedellä. PSK:n mukaan DN200 kokoinen putki vaatii tuennan vähintään kuuden metrin välein. Kannatinpalkille asetettava kuormitus on tällöin 12 kN/m. Kuormitus asetetaan kuitenkin joka toiselle kannatinpalkille. Lisäksi moduulivälin päätykehille asetetaan puolet kannatinpalkin kuormasta. Jokaisen kannatinpalkin kuitenkin tulee pystyä kantamaan putkiston kuormitus.
- Putkiston aiheuttama kitkakuormitus on paikallisesti 30% pystysuuntaisesta kuormituksesta. Globaaliin laskentamalliin asetetaan 50% suuruinen kitkakuormitus paikallisesta

kitkakuormituksesta laskien. Kuormitus asetetaan pystysuuntaisen kuormituksen mukaisille kannatinpalkeille. Kaikki kannatinpalkit suunnitellaan kantamaan kitkakuormitus, vaikka laskentamallissa kitkakuormaa ei aseteta kaikille palkeille vaikuttamaan.

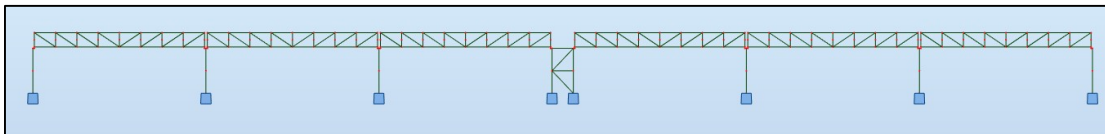
- Putkisto on aseteltu kahdelle tasolle, ristikon päälle jätetään laajennusvaraus tuleville putkiasennuksille. Laajennusvarauksen kuormitus vastaa alempia kannatinpalkkitasoja.
- Tuulikuormitus on maastoluokka 1 mukainen. Tehdään myös alkuarvauksena konservatiivinen oletus, ja oletetaan rakenne suljetuksi tuulipintaa määriteltessä.
- Taipumarajat:
 - o Kannatinpalkille L/300
 - o Moduuli L/600
- Vaakasuunnan ja pituussuunnan rajat siirtymille:
 - o Moduulin päätykehälle H/150
 - o Putkisillan pilareille H/400
 - o Moduulin vaakasuunnalle L/600
- Nostojärjestelmä vaatii neljä nostopistettä, noston kuormituksena rakenteen omapaino ja 40% putkiston kuormituksesta. Putkiston kuormitus vaikuttaa tyhjäpainona, koska putkisto on asennettu moduuliin valmiiksi konepajan toimesta.
- Yhdistelmät ja kuormitukset perustuvat Eurokoodiin.

Tässä työssä tutkittavissa rakenteissa käytetään taulukon 7 mukaisia profiileja. I-Profiilit ovat eurooppalaisia HEA- tai HEB-profiileja. Putkiprofiilit ovat SSAB:n neliönmuotoisia rakenneputkia. Tutkittavat rakenteet ovat aikaisemmin suunnitelluista rakenteista mukailtuja malleja. Tutkittavien rakenteiden profiilit ovat määritetty alkuarvauksina. Tarkempi alkuarvausten laskenta on esitetty tämän työn liitteessä III. Tutkittavat laskentamallit on jaoteltu kolmella tavalla käytettävien profiilien mukaan. Yksi laskentamalli koostuu pelkästään avonaisista poikkileikkauksista, toinen koostuu pelkistä suljetuista poikkileikkauksista, ja kolmas näiden yhdistelmästä.

Taulukko 7. Alkuarvaukset poikkileikkauksille laskentamallin laatimista varten.

	Avonaiset profiilit	Putkiprofiilit	Yhdistelmä
Pilari	HEB240	200x200x10	HEB240
Paarre	HEB180	150x150x10	150x150x10
Ristikon sauvat	HEA140	120x120x6	120x120x6
Päätykehän profiilit	HEB220	180x180x10	HEB220
Pilarin jäykisteet	HEA140	120x120x6	120x120x6
Kannatinpalkit	HEA120	120x120x6	HEA120
Tasojäykisteet	HEA140	120x120x6	120x120x6

Alkuarvausten kestävyyttä tutkittiin modulaarisessa ratkaisussa Pratt-ristikkoa käyttäen. Kuva 27 esittää modulaarista rakennejärjestelmää Pratt-ristikon geometrialla. Kuvassa 27 esitettyyn laskentamalliin profiilit on asetettu alkuarvausten mukaisesti. Kuormitukset ja kuormitusten yhdistelmät asetettiin tässä työssä esitettyjen lähtötietojen perusteella. Laskennan tuloksena saatiin käyttöasteet murtorajatilassa ja siirtymät käyttörajatilassa. Alkuarvausten mukaiset profiilit kestävät murtorajatilassa. Muodostetut laskentamallit ovat kokonaisuudessa kuvan 27 mukaisia. Modifioidusta Warren ristikosta on muodostettu vastaava laskentamalli. Kaikki tulokset tässä työssä luetaan neljän pilarin muodostaman tornin vasemmanpuoleisesta moduulista.



Kuva 27. Modulaarinen rakennejärjestelmä laskentamallissa.

6.2 Tulokset

Tässä kappaleessa esitellään tuloksia laskentamallista. Pilareiden orientaatiota tutkittiin erikseen pituussuuntaisten kuormitusten vaikutusten esittelemiseksi. Muut tulokset käsittelevät moduulivälin laskentaa käyttöasteiden, siirtymien ja käytettävän teräsmäärän mukaan.

Taulukon 8 tutkimus tehtiin vain I-poikkileikkauksen pilareille Pratt-ristikon geometrialla. Siirtymät laskettiin käyttörajatilassa ja lämpötilakuormituksen vallitessa. Pilarin käyttöasteet laskettiin murtorajatilassa.

Taulukko 8. Pilarien orientaation vaikutus laskentaan.

	Pilarin käyttöaste (%)	Pilarin yläpään siirtymä käyttörajatilassa (mm)	Pilarin yläpään siirtymä lämpötilakuormitusten vaikutuksessa (mm)
Pilarin uuma putkisillan moduulin suuntaisesti (vahva suuntaa moduulin suuntaa vastaan)	75	5	7
Pilarin uuma kohtisuorassa putkisillan moduulia vastaan (heikko suunta moduulin suuntaa vastaan)	79	5	8

Taulukoihin 8 ja 9 on valittu suurimmalla kuormituksella olevat sauvat. Vinosauvan tapauksessa tutkitaan ensimmäisen välin vinosauvan käyttöastetta. Vertikaalisauvan tapauksessa puolestaan keskimmäisen sauvan käyttöastetta.

Taulukko 9. Paikoilleen rakennettavien rakenteiden tulokset laskennasta.

	Teräs- määrä (kg)	Vinosau- van käyt- töaste (%)	Vertikaali- sauvan käyttöaste (%)	Paarteen käyttöaste (%)	Pilarin käyttöaste (%)	Moduuli- välin ko- konais- siirtymä (mm)
Pratt (Avopro- fiileilla)	77 571	45	41	34	78	15
Pratt (Hybridi)	73 277	48	42	34	77	18
Pratt (Put- kiprofii- leilla)	60 990	52	35	26	83	20
Warren (Avopro- fiileilla)	74 647	65	13	19	76	16
Warren (Hybridi)	63 695	54	13	21	77	18
Warren (Putkipro- fiileilla)	60 378	54	14	21	76	18

Taulukko 10. Paikoilleen nostettavan rakenteen tulokset laskennasta.

	Teräs- määrä (kg)	Vinosau- van käyt- töaste (%)	Vertikaali- sauvan käyttöaste (%)	Paarteen käyttöaste (%)	Pilarin käyttöaste (%)	Moduuli- välin siirtymä (mm)
Pratt (avo- profii- leilla)	79 426	35	20	54	77	25
Pratt (Hybridi)	82 346	39	20	54	75	26
Pratt (Put- kiprofii- leilla)	63 928	39	25	55	81	35
Warren (Avopro- fiileilla)	78 954	24	6	63	80	27
Warren (Hybridi)	76 289	64	10	53	80	27
Warren (Putkipro- fiileilla)	63 930	56	9	51	78	33

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Putkisiltojen suunnittelu on pitkä ja työläs projekti. Monilla tässä työssä esitetyillä seikoilla on merkittäviä vaikutuksia lopputulokseen. Putkisilta on lähes poikkeuksetta hankekohtaisten seikkojen myötä ainutkertainen rakennejärjestelmä, vaikkakin samantyyppisiä rakennejärjestelmiä toteutetaan useita.

Hankekohtaisesti rakennesuunnittelijan kannattaa ensimmäisenä selvittää kokoonpanon ja pintakäsittelyn vaatimukset, mitkä vallitsevat hankkeessa. Rakenteen kokoonpanon toteuttaminen vaikuttaa erityisesti kuljetusmenetelmien vaatimusten huomioon ottamisen tarpeellisuuteen.

Kokoonpano voidaan toteuttaa paikalleen rakennettuna, mitä kuljetusmenetelmät rajoittavat kaikkein vähiten. Paikalleen rakennetun rakenteen huonona puolena on työmaaliikenteen häiriöitä, joita putkisillan rakentamisesta aiheutuu. Putkisillat kulkevat yleensä tehdasalueen kulkureittien vieressä ja niiden ylitse. Rakenteen kokoonpano voidaan toteuttaa hankealueen kokoonpanoalueella. Hankealueen kokoonpanoalueella koottava rakenne ei vaadi työmaalle saapuvalta kuljetukselta yhtään enempää kuin paikoilleen rakennettava rakennekaan. Koottu rakenne täytyy kuitenkin vielä siirtää paikoilleen. Kolmas vaihtoehto edellä mainituille menetelmille on kokoonpanon toteuttaminen konepajan tiloissa ja kuljettaa rakenne työmaalle. Modulaarisen rakenteen paikoilleen asennuksessa etuna on vähentynyt haitta työmaaliikenteelle, koska nosto on huomattavasti nopeampi suorittaa kuin rakenteen rakentaminen paikalleen.

Kuljetusmenetelmä ja -reitti voivat asettaa ankaria mitta- ja painovaatimuksia kuljetettavalle rakenteelle. Lisäksi kuljetusmenetelmän kustannukset kasvavat kuljetettavan moduulin mittojen ja painon myötä. Suurempi kuljetettava kappale vaatii monimutkaisemmat erityisjärjestelyt. Liitteessä I esitellään kuvissa 30 ja 31 maantiekuljetustuen vaatimuksia ja rajoitteita. Liitteen I rajoitteet perustuvat Suomen tieliikennelakiin, mutta kuvaavat hyvin sitä, kuinka hankkeessa noudatettava tieliikennelaki voi rajoittaa modulaarisen rakenteen ulkomittoja.

Kuljetusmenetelmän vaatimukset voivat johtaa modulaarisen rakenteen muuttamiseen pienempiin osiin, mitkä täyttävät vaatimukset.

Laajennusvaruksesta täytyy sopia asiakkaan kanssa hankekohtaisesti. Laajennusvaruksen kuormitukset ja tilantarve täytyy arvioida suunniteltavaan rakenteeseen. Tulevaisuuden mahdollisia putki-, kaapeli- ja laiteasennuksia on erityisen hankala ennakoida. Kirjallisuudesta löytyy perussääntönä laajennusvarauksen suuruudeksi 20% suunniteltavista instrumenteista. Laajennusvarauksen tärkeys korostuu perustusten suunnittelussa, koska perustusten kasvattaminen rakennuksen valmistumisen jälkeen on lähes mahdotonta.

Monen eri osapuolen kanssa sovittavia asioita on useita: putkisillan reititys hankealueella, siirtymäraajat ja hankkeessa huomioon otettavat kuormitukset. Putkisillan reitityksestä suurin vaikutus tulee moduulien pituuksiin ja pilareiden sijoittamiseen. Tässä työssä esitettyssä esimerkkilaskelmassa oletettiin, että pilarit saadaan sijoitettua samalle suoralle tasaisin välein. Moduulien mitat pysyivät täten samansuuruisina. Teollisuusalueet ovat tyypillisesti erityisen monimutkaisia. Kaikkia moduuleja voidaan harvoin suunnitella yhtä pitkiksi teollisuusalueen järjestelyistä johtuen.

Putkisillan rakennejärjestelmän erityispiirteenä on lämpötilan muutoksista johtuva lämpöliike. Rakennejärjestelmä on suunniteltava siten, että lämpöliikkeet tapahtuvat hallitusti ilman pakkovoimien esiintymistä rakenteessa. Putkisillan kiintopisteiden suunnittelu on merkittävä seikka lämpöliikkeiden hallinnassa. Lämpöliikettä voidaan vastustaa pilareiden taivutusvastuksen avulla. Mikäli putkisilta on erityisen pitkä suoralta osuudeltaan, on syytä harkita soikeiden reikien käyttämistä lämpöliikkeiden hillitsemiseksi. Hankkeessa voidaan sopia tarkemmin soikeiden reikien käytöstä. Edellä mainittujen seikkojen avulla estetään rakennejärjestelmän lukkiutuminen. Rakennejärjestelmän lukkiutuessa syntyy ylimääräisiä kuormituksia.

Putkisillan kuormitukset koostuvat luonnonkuormista, putkiston kuormituksista ja muista kuormista. Putkistosuunnittelijan tulee ilmoittaa rakennesuunnittelijalle putkistosta aiheutuvat kuormitukset. Putkiston tuenta on merkittävä tekijä putkiston kuormitusten syntymisessä. Luvussa 4.3 esitellään putkiston tuennan komponentteja, jotta rakennesuunnittelija

ymmärtää paremmin putkistosuunnittelijaa. Muut kuormitukset rakennesuunnittelijan tulee määrittellä hankkeessa muiden määrättyjen seikkojen perusteella.

Siirtymäraajat määräytyvät putkiston, kaapeleiden ja laitteiston vaatimusten perusteella. Standardien määrittelemiä siirtymärajoja voidaan käyttää hankkeessa, mutta asiakkaan tai putkistosuunnittelijan vaatimukset voivat olla ankarammat. Siirtymärajoista täytyy ensisijaisesti sopia putkistosuunnittelijan ja asiakkaan kanssa. Tässä työssä käytetyt siirtymäraajat ovat määritelty standardien määräysten mukaisesti.

Modulaarisen rakenteen ja paikoilleen rakennetun rakenteiden välille muodostui eroja siirtymien suhteen käyttörajatilassa. Työn esimerkilaskelmassa käytettiin $L/600$ rajoitetta moduulin siirtymälle. Kaikki laaditut laskentamallit toteuttivat vaaditun ehdon. Paikoilleen rakennettavissa rakenteissa siirtymät olivat selvästi pienemmät kuin modulaarisissa rakenteissa. Siirtymien esiintymisen erot on hyvä ottaa huomioon, kun hankkeessa tehdään valinta paikoilleen rakennettavan ja paikoilleen nostettavan rakenteen välillä.

Asiakkaan kanssa tulee sopia hankkeessa noudatettavasta standardista rakenteen kuormituksille. Lisäksi tulee määrittellä hankealueella vaikuttavat luonnonkuormitukset. Tuulikuorman määrittystä varten vaaditaan hankealueen tuuliolosuhteiden kuvaus. Seismisen aktiivisuuden määrittely on tarpeen suorittaa ennen tarkemman suunnittelun aloittamista. Seisminen aktiivisuus vaikuttaa esimerkiksi käytettäviin jäykistysjärjestelmiin. Eurokoodi 8:ssa on määritelty jäykistysjärjestelmien geometrioita maanjäristysalueelle. Jäykistysjärjestelmään voi vaikuttaa myös tilavaraukset, joita tehdasalueella on laadittu.

Tässä työssä tutkittiin lisäksi erilaisten ristikkogeometrioiden sopimista putkisillan rakennejärjestelmään. Tutkitut ristikkogeometria olivat Pratt- ja Warren-ristikot. Putkiston reitittämisessä molemmat ristikkogeometriat ovat mahdollisia sovittaa putkisillan rakennejärjestelmään.

Pratt-ristikon etuna on diagonaalien toiminta ainoastaan vetosauvoina. Vetosauvojen suunnittelu on vähemmän työlästä. Liitosten suunnittelu on myös yksinkertaisempaa Pratt-ristikon tapauksessa, koska liitokset ovat pääasiallisesti helpompia N- ja T-liitoksia. Keskellä

Pratt-ristikkoo on KT-liitos, joka on monimutkaisempi suunnitella suuremmasta sauvojen lukumäärästä liitoksessa.

Warren-ristikosta joudutaan tässä työssä käyttämään modifioitua versiota, koska muussa tapauksessa kannatinpalkeille ei ole sopivia sijainteja kiinnityksille. Modifioidussa Warren-ristikossa on lisätty vertikaalisauvoja diagonaalisauvojen väliin. Vertikaalisauvoihin voidaan kiinnittää kannatinpalkit. Lisättyjen vertikaalisauvojen ansiosta paarteiden nurjahduspituudet voidaan lyhentää, mikä auttaa etenkin puristetun paarteen suunnittelussa. Modifioidun Warren-ristikon liitoksista muodostuu monimutkaisia KT-liitoksia. Tämän työn vaatimusten ja valintojen perusteella modifioidussa Warren-ristikossa on runsaasti KT-liitoksia. KT-liitosten suunnittelu on työläämpää kuin yksinkertaisempien liitosten suunnittelu.

Laskentamallissa liitoksille asetettavia vapausasteita tulee harkita tarkkaan. Ristikon liitoksiin asetettu nivelliitos on normaalikäytäntö ristikoiden suunnittelussa. Tämä pätee sekä hitsattuihin että pulttiliitoksiin. Kannatinpalkeille asetettiin myös nivelliitoksen vaatimus, koska esimerkkilaskelman rakennejärjestelmässä ylimmän ja alimman kannatintason palkit toimivat ristikon sauvana. Keskimmäisen kannatintason palkille annettiin sama vaatimus liitokselle tämän työn esimerkkilaskelmassa.

Esimerkkilaskennan tulosten perusteella Pratt-ristikko sopii paremmin putkisillan rakennejärjestelmään käytetyn teräsmäärän perusteella. Warren-ristikon kirjallisuudessa esitettyjä etuja voi hyödyntää kahden kannatustason putkisillassa, milloin diagonaalien väliin ei tarvitse lisätä vertikaalisauvoja putkiston tuentaa varten.

Tässä työssä muodostettiin alkuarvaukset rakenteessa käytettäville poikkileikkauksille. Alkuarvausten laskennassa kuormituksena käytettiin vain putkiston painoa. Alkuarvaukset asetettiin laskentamalliin, jossa esimerkkilaskennan kaikki kuormitukset olivat asetettu vaikuttamaan rakennejärjestelmään. Alkuarvausten poikkileikkaukset olivat murtorajatilassa turvallisella puolella jättäen vielä mahdollisuuksia optimointiin materiaalin käytön puolesta.

Ristikon sauvojen käyttöasteet jäivät erityisen mataliksi. Annetuilla lähtötiedoilla olisi mahdollista pienentää useita sauvoja jokaisessa laaditussa laskentamallissa. Kirjallisuudessa esitettiin modulaaristen rakenteiden olevan 30 – 50% raskaampia materiaalin käytön suhteen.

Tässä työssä laaditut laskentamallit eivät tätä noudata. Toisaalta optimointia ei suoritettu loppuun asti rakenteiden sauvoille, joten syntyneet erot johtuvat rakenteiden muodoista. Modulaariset rakenteet ovat raskaampia, mikä johtuu ensisijaisesti moduulien päissä olevista jäykistä kehistä. Jäykkiin kehiin materiaalia kuluu lähes kaksinkertaisesti verrattuna paikoilleen rakennettavaan rakenteeseen. Suurempi materiaalin kulutus johtuu nimenomaan kahdesta perättäisestä kehostä, kun paikoilleen rakennettavaan rakenteeseen kehiä tulee vain yksi.

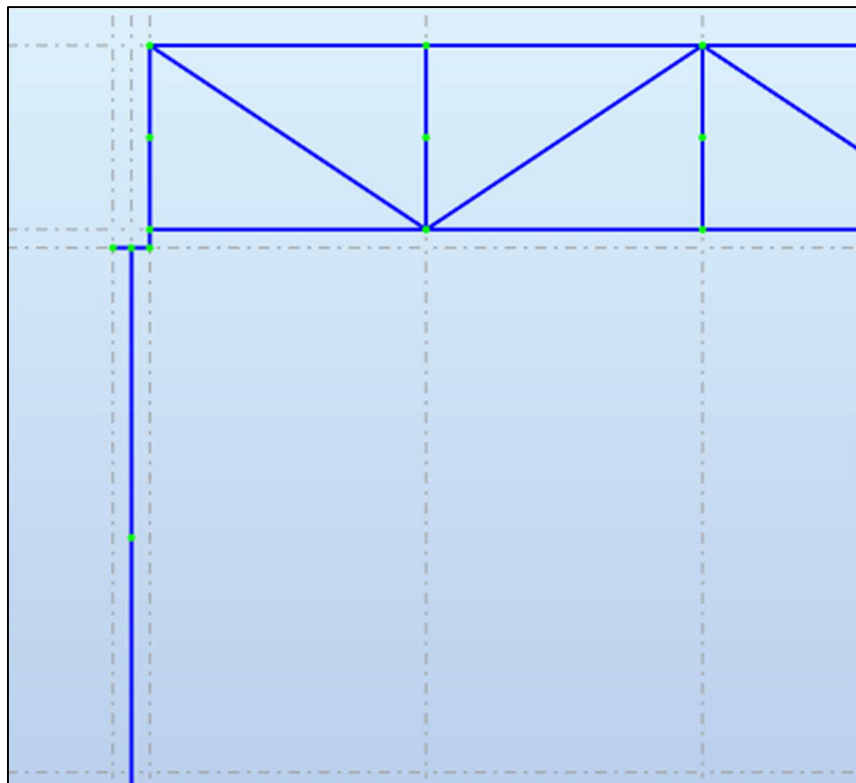
Kirjallisuuteen nojaten Warren-ristikosta tyypillisesti voidaan suunnitella kevyempiä rakenteita kuin vastaavasta Pratt-ristikosta. Tässä työssä tehtyjen valintojen perusteella tämä tilanne ei täysin toteudu. Kirjallisuus olettaa, ettei Warren-ristikkoon tarvitse lisätä vertikaalisauvoja. Kirjallisuudessa esitetään, että vertikaalisauvat lisäävät Warren-ristikon massaa merkittävästi. Pratt- ja modifioidun Warren-ristikon välinen painoero ei ole suuri. Warren-ristikon ominaisuuksista ei voida hyödyntää keveyttä parhaalla mahdollisella tavalla tämän työn esimerkkilaskelmassa. Modifioidussa Warren-ristikossa lisättyä vertikaalisauvoja kuormitetaan erityisen vähän. Pääasiallisena kuormituksena edellä mainituille sauvoille on putkiston kuormitukset kannatintasoilta. Modifioidussa Warren-ristikossa vertikaalisauvoilla tuetaan puristettua paarretta nurjahduksen estämiseksi, mikä mahdollistaa pienemmän profiilin käyttämisen paarteessa.

Pilareiden orientaation vaikutusta tutkittiin avoprofiileita käytettäessä. Putkiprofiilit jätettiin huomiotta, koska valitut poikkileikkaukset ovat kaksoissymmetrisiä. Avoprofiilien poikkileikkauksella on vahvempi ja heikompi akseli. Orientaation valintaan vaikuttaa erityisesti lämpötilasta ja tuulesta syntyvät kuormitukset. Tässä työssä putkisillan pienistä ulkomitoista johtuen lämpötilasta johtuvat kuormitukset tuottavat suuremman vaikutuksen pilareiden siirtymiin. Suuremmilla ulkomitoilla on mahdollista, että tuulikuorma on merkittävämpi putkisillan poikittaissuunnassa. Rakennesuunnittelijan on hankekohtaisesti arvioitava pilareiden orientaatiota.

Eri profiilien käyttöä tutkittiin työssä myös. Putkiprofiileista muodostetut rakennejärjestelmät olivat kevyempiä kuin avoprofiileista muodostetut rakennejärjestelmät. Putkiprofiileja ei ole aina saatavilla, vaan profiilien käytöstä tulee sopia hankekohtaisesti. Profiilien saata-

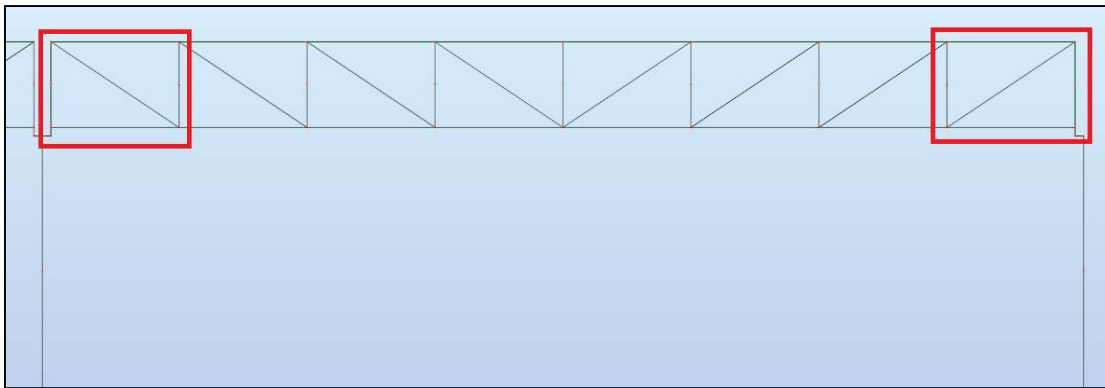
vuudessa voi olla alueellisia eroja, mikä vaikuttaa hankkeessa käytettävien profiilien valintaan. Käyttämällä avo- ja putkiprofiilien yhdistelmää voidaan saavuttaa etuja liitosten suunnittelussa ja rakenteen painossa.

Asennuksen aikaiset kuormitukset voivat poiketa käyttötilanteesta merkittävästi. Modulaarisen rakenteen asennuksessa syntyy tilanne, jossa toinen moduuli nostetaan paikoilleen pilareiden päälle ennen toista moduulia. Kuva 28 esittää edellä mainittua kuormitustilannetta. Moduulien nostojen kuormitukset ovat pienempiä verrattuna käyttötilanteeseen. Tässä työssä nostettavan moduulin paino esitettiin luvussa 3.4, mikä kuormittaa pilareita kuvan 28 tilanteessa. Modulaarisen rakenteen nostossa kuormaksi voidaan asettaa rakenteen oma paino, johon lisätään 40% putkiston käyttötilanteen painosta ellei muuta kuormitusta ole hankkeessa määritetty. Kuvan 28 tilanteessa merkittävä seikka on epäkeskeinen kuormitus pilareiden keskilinjoihin nähden, millaista tilannetta ei tutkittu tässä työssä. Rakennesuunnittelijan tulee arvioida hankekohtaisesti esitetyn tilanteen merkittävyys suunnittelussa.



Kuva 28. Pilareiden kantamista moduuleista toinen on asennettu paikoilleen.

Moduulien ristikon muotoon vaikuttaa voimakkaimmin putkiston vaatima tuentaväli. Ristikon muodon optimointia voidaan tavoitella, mutta tuentaväli on otettava huomioon optimimittoja määrittäessä. Kuva 29 esittää tilannetta, jossa yhden moduulin täytyy olla lyhyempi kuin muut moduulit. Kuvan 29 tapauksessa on helpointa muuttaa päätykehän ja ensimmäisen vertikaalisauvan välimatkaa. Ristikon mittojen muutoksia täytyy kuitenkin pyrkiä minimoimaan.



Kuva 29. Ehdotus paikoista ristikossa, jossa moduulien mittojen erojen tasaus tehdään.

Putkisillan rakenteen pintakäsittely voi vaikuttaa etenkin modulaarisen rakenteen ulkomittoihin. Rakenne voidaan suojata korroosiolta maalauksella tai kuumasinkityksellä. Kuumasinkityksessä sinkityspadan mitat voivat rajoittaa suurimman mahdollisen suunniteltavan kappaleen ulkomittoa. Lisäksi kuumasinkityksessä on suunniteltava tarvittavat aukot, jotta ylimääräinen sinkki valuu pois. Maalauksessa tärkeintä on luoksepäästävyys. Pintakäsittelyä on sovittava hankekohtaisesti tarvittavien osapuolien kesken.

Tässä työssä koottiin putkisiltojen suunnittelun vaikuttavia seikkoja ja esiteltiin esimerkkilaskelman avulla eri valintojen vaikutuksia käytettyyn materiaalin määrän ja siirtymiin. Myös rakenneosien käyttöasteita määritettiin, koska se toi esille eroja laskentamalleissa. Käyttöasteilla pystyimme tuomaan esille eroja rakennejärjestelmien välille, kun muiden arviointikriteerien erot eivät olleet suuria. Käyttöasteet ovat rakennesuunnittelijan kannalta mielenkiintoisia, mutta asiakkaan ja putkistosuunnittelijan kannalta käyttöasteet eivät ole merkittäviä verrattuna muihin kriteereihin.

Liitosten suunnittelu rajattiin tämän työn ulkopuolelle, mutta niiden tarkempi tutkimus voisi olla hyödyllistä. Putkisillan rakenteessa on tyypillisiä ristikkoliitoksia, joiden suunnitteluun löytyy tarkat ohjeet Eurokoodista. Paikoilleen rakennettavan rakenteen paarteiden liitoksen suunnittelu pilareihin voisi olla hyödyllistä lisätietoa aiheesta tuottava tutkimus. Myös modulaarisen rakenteen liittäminen pilareihin olisi hyvä tarkastella lähemmin. Edellä mainituissa liitoksissa voidaan käyttää soikeita reikiä lämpöliikkeiden hillitsemiseen.

LÄHTEET

AFRY. Tietoa meistä. 2021. [AFRYn www-verkkosivuilta]. [Viitattu 10.11.2021a]. Saatavissa: <https://afry.com/fi-fi/tietoa-meista>

AFRY. Sisäinen materiaali. [Viitattu 10.11.2021b]

Antaki, G. 2003. Piping and pipeline engineering; Design, construction, maintenance, integrity and repair. Marcel Dekker Inc. New York. s 126149.

Aquatherm. 2012. Aquatherm and hanger spacing. [Yrityksen WWW-sivu]. Saatavissa: <https://aquatherm.com/tech-bulletins/aquatherm-and-hanger-spacing>

Bailey, R. Gilbert R. Summers, P. 2011. Wind loads for petrochemical and other industrial facilities. Amoroso, S. Fong, K. Garza, J. Hanna, M. Harnly, D. Hebert, K. Levitan, M. Li, G. Mayes, G. Prasad, R. Rennals, N. Stysliger, A. Waller, W. Wissehr, J. Wong, S. Wright, R. Young, G. Reston, Virginia. American society of civil engineers. 177 s.

Bedair, O. 2014. Modern steel design and construction in Canada's oil sands industry. Teoksessa: Hauke, B. Steel construction design and research. Volyymi 7, PAINOS 1. Ernts & Sohn. Berlin. 2014. s. 32 – 40.

Bendapudi, P.E. 2010a. Structural design of steel pipe support structures. Structure magazine. PAINOS: February 2010. s. 6 – 8.[Viitattu 7.12.2020]

Bendapudi, P.E. 2010b. Structural design of steel pipe support structures. Structure magazine. PAINOS: September 2010. s. 38 – 40.[Viitattu 7.12.2020]

Bridge brothers Inc. 2021. Pipe bridge builder pre-engineered modular pipe rack. [Yrityksen WWW-sivu]. Saatavissa: <https://bridgebrothers.com/pipe-bridge-creator/>

CEN/TR 15728. 2016. Design and use of inserts for lifting and handling of precast concrete elements. Helsinki. Suomen standardoimisliitto SFS. 45 s.

Davison, B. Owens, G. 2011 Steel designers' manual. 7. Painos. West Sussex. Wiley & Sons. 1350 s.

Drake, R.M. Walter, R.J. 2010. Design of structural steel pipe racks. In: Engineering journal. New York. Fourth quarter, 2010. Painos 47. s. 241251.

ELY-Keskus. 2010. Erikoiskuljetukset – Erikoiskuljetusluvan tarve, hakeminen ja käytännön toimenpiteet. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.ely-keskus.fi/documents/10191/139801/erikoiskuljetukset_esite_2010_erikoiskuljetusluvan_tarve_hakeminen_ja_kaytannon_toimenpiteet.pdf/cbcf0229-5b1f-4e7e-8d9b-9bad0a271b51

Escoe, A.K. 2006. Piping and pipeline assessment guide. Burlington. Elsevier. s. 50 88.

Inspectioneering. Overview of small bore piping (SBP). 2021. [Viitattu 18.11.2021]. Saatavissa: <https://inspectioneering.com/tag/small+bore+piping#tabSummary>

Kullaa, J. Leino, T. Kärnä, T. 1998. Maanjäristyksen kestävät teräsrakenteet. VTT Rakenustekniikka. Espoo. s. 59.

Lee, JH. Huh, J. Lee, JJ. 2015. A comparative study on wind loads between design standards for the design of pipe-rack structures. Teoksessa: Son, M. KSCE Journal of Civil Engineering. Lee, C. Ryou, JS. Song, H. Bek, H. Kim, K. 20. painos, osa 1. 2016. s. 293300.

Livelli, G. Langill, T. 1998. Guidelines for welding galvanized steel. Teoksessa: PCI Journal. Volyymi 43. Painos 3. s. 4048.

Nordic galvanizers. 2019. Galvanizing handbook[Verkkodokumentti]. Tukholma. Kesäkuu 2020. [Viitattu 19.10.2021]. 60 s. Saatavissa PDF-tiedostona: http://nordicgalvanizers.com/wp-content/uploads/2020/08/NG_Kuumasinkityskasikirja-1.pdf

Olearczyk, J. Kainat, M. Kosa, J. Adeeb, S. Al-Hussein, M. 2015. Heavy lify rigging algorithm for construction operation (iRigging). Proceedings of Creative construction conference 2015. Krakova. 21-24.7.2015. s. 48-53.

Ongelin, R: Valkonen, I. 2012. Rakenneputket. Keuruu. Rautaruukki Oyj. 690 s.

Ongelin, R. Valkonen, I. 2010. Hitsatut profiilit. Keuruu. Rautaruukki Oyj. 610 s.

PIP. 2007. PIP STC01015, structural design guide. Process industry practices. Austin Texas. 50 s.

PSK 2702. 2008 Kuumasinkittyjen teräsrakenteiden hankinta ja maalaus. Käyttösuositus prosessiteollisuudelle. PSK Standardointi. 3. Painos. 36 s.

PSK 3001. 2018. Rakennustehtäväpiirustus. Laadinnan perusteet. PSK Standardointi. 4 s.

PSK 7302. 2018. Putkiston kannakointi: Kannakestandardien käyttö. PSK Standardointi. 3. Painos. 20 s.

PSK Käsikirja 8. 2019. Putkiston kannakointi. PSK Standardointi. 2. Painos. 355 s.

RIL 144-1997. 1997. Rakenteiden kuormitusohjeet. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry. Helsinki. 189 s.

SFS-EN 1990 + A1 + AC. 2006. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki. Suomen Standardoimisliitto SFS. 186 s.

SFS-EN 1991-1-4 + A1 + AC. 2011. Eurocode 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat. Helsinki. Suomen Standardoimisliitto SFS. 256 s.

SFS-EN 1991-1-6. 2016. Eurocode 1. Rakenteiden kuormat. Osa 1-6: Yleiset kuormat. To-teuttamisen aikaiset kuormat. 2. painos. Helsinki. Suomen standardoimisliitto SFS. 54 s.

SFS-EN 1991-1-7 +A1 +AC. Eurocode 1. Rakenteiden kuormat. Osa 1-7: Yleiset kuormat. Onnettomuuskuormat. 2. painos. Helsinki. Suomen standardoimisliitto SFS. 119 s.

SFS-EN 1993-1-8. 2005. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Helsinki. Suomen Standardoimisliitto SFS. s. 3336.

SFS-EN 1998-1. 2005. Eurocode 8 Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. 231 s.

SFS-EN ISO 14713-2. 2020. Zinc coatings – Guidelines and recommendations for the protection against corrosion of iron and steel structures – Part 2: Hot dip galvanizing. 2. Painos. Helsinki. Suomen Standardoimisliitto SFS. 29 s.

Sisti, T. 2019. SPED Tech Tuesday: Design of expansion loops – Design quality improvement. [Verkkodokumentti] Julkaistu 29.4.2019. Society of piping engineers and designers. Saatavissa: <https://www.spedweb.com/technical-information/articles/sped-tech-tuesday-auxiliary-pipe-supports-consider-the-cost-2>

SKOL ry. Teräselementtien käsittelyohjeet. 34 s. Saatavissa: https://skol.teknologiateollisuus.fi/sites/skol/files/Teräselementtien_kasittelyohjeet.pdf

Smith, P.R., Van Laan, T.J. 1987. Piping and pipe support systems; Design and engineering. New York. McGraw-Hill Book Company. 334 s.

Soules, J.G. Johnson, G.S. Nisar, A. 2020. Seismic evaluation and design of petrochemical and other industrial facilities. 3.Painos. Reston, Virginia. American society of civil engineers. 346 s.

TLV, 2017. Best practices for condensate removal on steam lines. Saatavissa: <https://www.tlv.com/global/ME/steam-theory/steam-lines-best-practices.html>

Tukes. 2021. Vaarallisten kemikaalien käsittely ja varastointi. 43 s. Saatavilla: <https://tukes.fi/vaarallisten-kemikaalien-kasittely-ja-varastointi>

Työsuojeluhallinto. 2009. Nostoapuvälineet – Turvallisuus, Työsuojeluoppaita ja ohjeita 12. Tampere. Multiprint Oy. 45 s. Saatavissa: http://tyosuojelujulkaisut.wshop.fi/documents/2011/02/TSO_12.pdf

Työterveyslaitos. terästen hitsaussavun/huurun tavoitetasonperustelumuihistio. 2010. [Työterveyslaitoksen www-sivuilla]. Saatavissa: https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2016/12/Hitsaushuuru_tavoitetaso.pdf

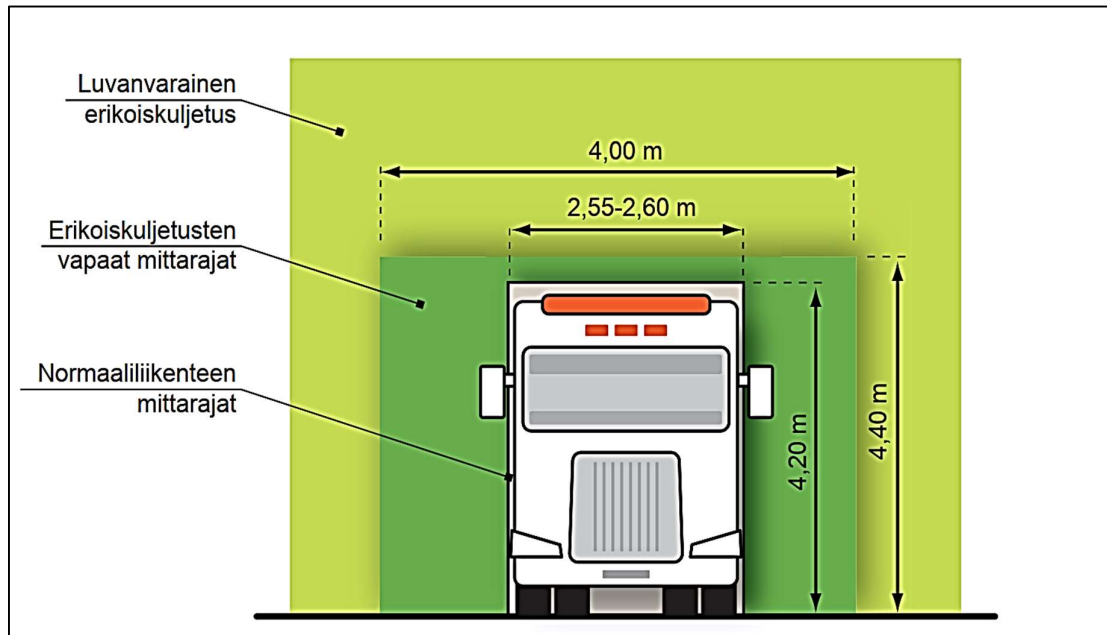
Vihdin kuumasinkitys. 2021. [Yrityksen kotisivut]. Saatavissa: <https://www.vihdinkuumasinkitys.fi/palvelu/>

Ympäristöministeriö. 2019. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Teräsrakenteet. Helsinki. 95 s.

17.12.1992/1715. Liikenneministeriön päätös erikoiskuljetuksista ja erikoiskuljetusajoneuvoista. [Viitattu 1.11.2021] Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1992/19921715#Pidm45237816511008>

Varoitustoimet	Kuljetuksen mitat													
	Korkeus yli 5 m	Kuljetuksen leveys B (m)												
		B ≤ 3			3 < B ≤ 3,5			3,5 < B ≤ 4			4 < B ≤ 5		5 < B ≤ 7	B > 7
		Kuljetuksen pituus L (m)												
	L ≤ 30	30 < L ≤ 40	L > 40	L ≤ 25,25	25,25 < L ≤ 30	30 < L ≤ 45	L > 45	L ≤ 30	30 < L ≤ 40	L > 40	L ≤ 35	L > 35	Kaikki pituudet	Kaikki pituudet
Varoitusautoja edessä	1	1	1		1	1	2	1	1	2	1	2	2	2
Varoitusautoja takana			1			1	1		1	1	1	1	1	1
Liikenteen ohjaaja	1	1	2			2	3		2	3	2	3	3	3
Poliisiauto tai varoitusauto ja liikenteen ohjaaja														1

Kuva 30. Erikoiskuljetusten vaatimat erityisjärjestelyt. (ELY-keskus 2010, s. 12)



Kuva 31. Kuljetusten mittarajojen periaatekuva. (ELY-keskus 2010, s. 5)

Putkiston tyypilliset kannatusvälit PSK 7304 mukaan.

DN	Ulkohalkaisija ja seinämänpaksuus Outer diameter and wall thickness	Kaasu / Gas		Neste / Liquid	
		Tuentatapa / Support type		Tuentatapa / Support type	
		Nivel Free	Jäykkä Rigid	Nivel Free	Jäykkä Rigid
15	21,3 x 2	1,6	2,8	1,5	2,6
20	26,9 x 2	2,0	3,4	1,8	3,1
25	33,7 x 2	2,3	4,0	2,0	3,5
32	42,4 x 2,3	2,7	4,6	2,4	4,1
40	48,3 x 2,3	3,0	5,1	2,5	4,4
50	60,3 x 2,3	3,5	6,0	2,9	4,9
65	76,1 x 2,6	4,1	7,0	3,3	5,4
80	88,9 x 2,9	4,5	7,8	3,6	5,8
100	114,3 x 3,2	5,4	9,1	4,2	6,3
125	139,7 x 3,6	6,1	10,0	4,8	6,8
150	168,3 x 4	7,0	11,0	5,3	7,4
200	219,1 x 4,5	8,3	12,6	6,2	8,1
250	273 x 5	9,6	14,2	7,0	8,7
300	323,9 x 5,6	10,9	15,4	7,6	9,3
350	355,6 x 5,6	11,6	16,2	7,7	9,4
400	406,4 x 6,3	12,6	17,3	8,2	10,1
450	457 x 6,3	13,7	18,4	8,4	10,2
500	508 x 6,3	14,7	19,4	8,5	10,4
600	610 x 6,3	16,7	21,3	8,7	10,7
700	711 x 7,1	18,5	23,1	9,3	11,4
800	813 x 8	20,1	24,7	9,9	12,1
900	914 x 10	21,3	26,1	10,9	13,4
1000	1016 x 10	22,5	27,6	11,0	13,5
1200	1220 x 12,5	24,7	30,2	12,3	15,1

Kuva 32. PSK 7304 mukaiset kannatusvälit eristämättömille hiiliteräsputkille. (PSK 7304 2018, S. 5)

DN	Ulkohalkaisija ja seinämänpaksuus Outer diameter and wall thickness	Kaasu / Gas		Neste / Liquid	
		Tuentatapa / Support type		Tuentatapa / Support type	
		Nivel Free	Jäykkä Rigid	Nivel Free	Jäykkä Rigid
10	17,2 x 1,6	1,4	2,5	1,3	2,3
15	21,3 x 1,6	1,7	2,9	1,5	2,6
20	26,9 x 1,6	2,0	3,4	1,7	3,0
25	33,7 x 1,6	2,3	4,0	2,0	3,4
32	42,4 x 1,6	2,7	4,7	2,3	3,9
40	48,3 x 1,6	3,0	5,1	2,4	4,2
50	60,3 x 1,6	3,5	6,0	2,7	4,7
65	76,1 x 1,6	4,1	7,0	3,0	5,2
80	88,9 x 2	4,5	7,8	3,4	5,9
100	114,3 x 2	5,4	9,3	3,9	6,6
125	139,7 x 2	6,2	10,6	4,2	7,0
150	168,3 x 2	7,0	12,1	4,6	7,2
200	219,1 x 2,6	8,4	14,4	5,0	7,4
250	273 x 3,2	9,8	16,7	5,6	7,6
300	323,9 x 3,2	10,9	18,7	6,4	8,6
350	355,6 x 3,2	11,6	20,0	6,7	8,7
400	406,4 x 3,2	12,7	21,4	7,5	9,6
450	457 x 3,2	13,8	22,7	7,8	9,7
500	508 x 4	14,8	23,9	8,7	10,7
600	610 x 4	16,7	26,2	9,7	11,9
700	711 x 4	18,5	28,3	9,9	12,1
800	813 x 4	20,2	30,3	11,0	13,5
900	914 x 4	21,9	32,1	12,3	15,0
1000	1016 x 5	23,5	33,8	12,4	15,2
1200	1220 x 6,3	26,5	37,1	13,8	16,9

Kuva 33. PSK 7204 mukaiset kannatusvälit eristämättömille ruostumattomille teräsputkille. (PSK 7304 2018, S. 6)

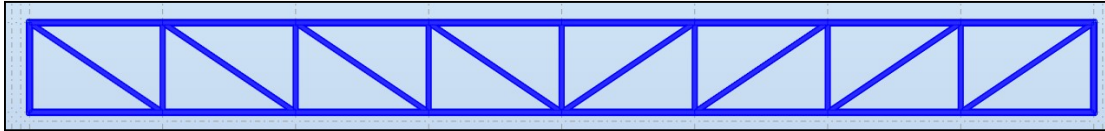
DN	Kaasu / Gas		Neste / Liquid	
	Eristyspaksuus Insulation thickness		Eristyspaksuus Insulation thickness	
	60 mm	120 mm	60 mm	120 mm
15	0,7	0,5	0,7	0,5
20	0,7	0,5	0,7	0,5
25	0,7	0,5	0,8	0,6
32	0,8	0,6	0,8	0,6
40	0,8	0,6	0,8	0,6
50	0,8	0,6	0,8	0,7
65	0,8	0,6	0,9	0,7
80	0,8	0,7	0,9	0,8
100	0,8	0,7	0,9	0,8
125	0,9	0,7	0,9	0,8
150	0,9	0,8	0,9	0,9
200	0,9	0,8	1,0	0,9
250	0,9	0,8	1,0	0,9
300	0,9	0,8	1,0	0,9
350	0,9	0,8	1,0	0,9
400	0,9	0,9	1,0	0,9
450	0,9	0,9	1,0	0,9
500	0,9	0,9	1,0	0,9
600	0,9	0,9	1,0	1,0
700	0,9	0,9	1,0	1,0
800	0,9	0,9	1,0	1,0
900	0,9	0,9	1,0	1,0
1000	0,9	0,9	1,0	1,0
1200	1,0	0,9	1,0	1,0

Kuva 34. PSK 7304 mukaiset kertoimet eristyspaksuuden vaikutuksesta hiiliteräsputkien kannatusväleihin. (PSK 7304 2018, S. 7)

DN	Kaasu / Gas		Neste / Liquid	
	Eristyspaksuus Insulation thickness		Eristyspaksuus Insulation thickness	
	60 mm	120 mm	60 mm	120 mm
10	0,6	0,4	0,7	0,5
15	0,6	0,5	0,7	0,5
20	0,7	0,5	0,7	0,6
25	0,7	0,5	0,8	0,6
32	0,7	0,6	0,8	0,6
40	0,7	0,6	0,8	0,7
50	0,7	0,6	0,9	0,7
65	0,8	0,6	0,9	0,7
80	0,8	0,7	0,9	0,8
100	0,8	0,7	0,9	0,8
125	0,8	0,7	0,9	0,8
150	0,8	0,7	0,9	0,8
200	0,8	0,7	1,0	0,9
250	0,8	0,7	1,0	0,9
300	0,9	0,7	1,0	0,9
350	0,9	0,7	1,0	0,9
400	0,9	0,8	1,0	0,9
450	0,9	0,8	1,0	0,9
500	0,9	0,8	1,0	0,9
600	0,9	0,8	1,0	1,0
700	0,9	0,8	1,0	1,0
800	0,9	0,9	1,0	1,0
900	0,9	0,9	1,0	1,0
1000	0,9	0,9	1,0	1,0
1200	1,0	0,9	1,0	1,0

Kuva 35. PSK 7304 mukaiset kertoimet eristyksen vaikutukselle kannatusväleihin ruostumattomille teräsputkille. (PSK7304 2018, S. 8)

LIITE III
ALKUARVAUSTEN LASKENTA



Kuva 36. Ristikon perusmalli 2D-tapauksen laskennassa.

Lähtötiedot:

Putkisillan ulkomitat ovat:

- Leveys 2,5 metriä
- Korkeus 2 metriä
- Pileri väliksi on sovittu 24 metriä
- Putkiston vaatima kannatusväli on 3 metriä tai enemmän

Kuormituksena on 2 kN/m² jokaisella kolmella putkiston kannakointitasolla.

$$w := 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad \text{Putkiston kuormitus tasokuormana}$$

Kannatin palkin mitoitus käyttäen vapaasti tuetun palkin laskentaa

$$L_{\text{kannatinpalkki}} := 2500 \text{ mm}$$

Sallittu taipuma on L/300 kannatin palkille, tällöin:

$$f_{\text{sall_kannatin}} := \frac{L_{\text{kannatinpalkki}}}{300} = 8.333 \text{ mm}$$

$$I_{\text{neliömomentti}} := 0$$

Yksi kannatin palkki kantaa kuormitusta 3 metrin mittaiselta matkalta tukivälistä johtuen. Tällöin tasaisesti jakautuneeksi viivakuormaksi q saadaan:

$$q := w \cdot 2500 \text{ mm} = 5 \frac{1}{\text{mm}} \cdot \text{N}$$

$$I_{\text{vaadittu}} := 0$$

$$E_{\text{teräs}} := 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Kuva 37. Alkuarvausten lähtötietojen määrittely,

Käytetään varmuuten 1,5 kerrointa putkiston kuormitukselle.

$$\gamma := 1.5$$

Poikkileikkauksen määrittämistä varten lasketaan seuraavaksi vaadittu neliömomentti sallitun taipuman mukaan.

$$I_{\text{vaadittu}} := \frac{5 \cdot \gamma \cdot q \cdot L_{\text{kannatinpalkki}}^4}{384 \cdot E_{\text{teräs}} \cdot f_{\text{soll_kannatin}}} = (2.18 \cdot 10^6) \text{ mm}^4$$

SSAB:n taulukoista ja muiden valmistajien tuoteluetteloista voimme hakea neliömomentin vaatiman palkin poikkileikkauksen alkuarvausta varten.

Putkiprofiiliksi valitaan 120x120x6, jonka neliömomentti on

$$I_{120x120x6} := (5.622 \cdot 10^6) \text{ mm}^4$$

Pienempikin poikkileikkaus kelpaisi kannatinpalkiksi, mutta sekä ylin että alin kannatintaso toimivat myös putkisillan rakenteen ristikon sauvoina kun rakenne muutetaan 3D-muotoon. Tästä syystä suurempi poikkileikkaus on perusteltua käyttää heti alkuarvauksena.

6mm seinämä vahvuus valittiin 5 mm seinämä vahvuuden sijaan. Tällä valinnalla on vaikutusta muiden sauvojen valintaan, etenkin paarteen tapauksessa.

Valitun poikkileikkauksen metripaino on 20,7kg/m mikä on pieni verrattuna putkiston kuormitukseen, joten sitä ei huomioida poikkileikkausten alkuarvausten muodostamisessa.

Rakenne mitoitetaan alkuarvauksissa pelkästään putkiston vertikaalin kuormituksen perusteella. Muut kuormitukset otetaan huomioon vasta laskentamallissa. Tämä pitää alkuarvausten muodostamisen riittävän yksinkertaisena.

I-profiiliksi valikoituu HEA120, jonka neliömomentti on

$$I_{\text{HEA120}} := 6.026 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Leveälaippaisen HEA-profiilin käyttön perusteltua, vaikka IPE-sarjan profiilit kelpaisivat myös, mutta putkiston kannakkeiden kiinnitys on helpompaa leveämpään pinta-alaan. Lisäksi putkistosta aiheutuu poikkileikkauksen heikommassa suunnassa rasituksia, jotka HEA-sarjan profiilit kestävät varmemmin kuin IPE-sarjan profiilit.

Myös on huomioitava samat seikat kuin putkiprofiilin valinnassa, eli alimman tason kannattin palkin tulee myös toimia ristikon sauvana.

Ristikon korkeus on 2 metriä, käytetään tätä arvoa palkin korkeutena. Palkin puristuslaipassa vaikuttava voima.

$$H_{\text{ristikko}} := 2000 \text{ mm}$$

Kuva 38. Kannatinpalkin valinta alkuarvaukseksi.

Maksimimomentin avulla voimme tehdä alkuarvauksen paarteen profiilille. Puristuspuolen paarre on kriittisempi. Käytämme sekä ylä- että alapaarteena samaa poikkileikkausta.

Nyt kannatinpalkin profiili on valittu, joten voimme siirtyä ristikon poikkileikkausten valintaan. Käytetään ristikolle palkki-analogiaa, eli mielletään putkisillan ristikko 2D-muodossa palkiksi. Tämän avulla voidaan yksinkertaisilla laskutavoilla saada alkuarvaus muodostettua poikkileikkauksille.

Ristikon pituuden ollessa 24 metriä ja putkiston kannatusvälin ollessa 3 metriä, ristikkoon asetetaan 3 metrin välein vertikaalisauva. Ristikon kuva on esitetty kuvassa 36. Vertikaalisauvaan voidaan kiinnittää siten kannatinpalkit. Kannatinpalkin päähän muodostuva tukireaktio yksinkertaisesti tuetun palkin laskentaa hyödyntäen:

$$F_{\text{tukireaktio_kannatin}} := q \cdot \frac{L_{\text{kannatinpalkki}}}{2} = 6.25 \text{ kN}$$

Jokaista vertikaalisauvaa kuormittaa 3 kannatinpalkkia, jolloin kokonaiskuorma yhdelle vertikaalisauvalle on:

$$F_{\text{vertikaali_kannatinkuorma}} := 3 \cdot F_{\text{tukireaktio_kannatin}} = 18.75 \text{ kN}$$

Vertikaalisauvoja ristikossa on kaikein kaikkiaan 9 kappaletta, jolloin ristikon kokonaiskuormaksi muodostuu:

$$F_{\text{ristikko}} := F_{\text{vertikaali_kannatinkuorma}} \cdot 9 = 168.75 \text{ kN}$$

Muutetaan viivakuormaksi:

$$Q_{\text{viivakuorma_ristikolle}} := \frac{F_{\text{ristikko}}}{24 \text{ m}} = 7.031 \frac{1}{\text{m}} \cdot \text{kN} \quad L_{\text{ristikko}} := 24 \text{ m}$$

Maksimimomentti on tällöin:

$$M_{\text{max_ristikko}} := \gamma \cdot Q_{\text{viivakuorma_ristikolle}} \cdot \frac{L_{\text{ristikko}}^2}{8} = 759.375 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Ristikon yläpaarteesen vaikuttava voima:

$$F_{\text{paarre_puristus}} := \frac{M_{\text{max_ristikko}}}{H_{\text{ristikko}} \cdot 0.5} = 759.375 \text{ kN}$$

Kuva 39. Paarteen kuormituksen laskenta alkuarvausta varten.

Paarre on tuettu 3 metrin välein sekä y-y-että z-z-akselin suhteen, jolloin nurjahduspituutena olisi sallittua käyttöä 2,7 metriä. Käytetään kuitenkin 3 metrin arvoa, koska tällöin putkiprofiili voidaan lukea SSAB:n putkiprofiilien taulukosta.

SSAB:n taulukon perusteella 3 metrin tukiväliä hyödyntäen putkiprofiiliksi saadaan 150x150x5. Kuitenkin on todettava jo alkuarvaus muodostettaessa, että paarteen seinämäpaksuuden olisi suositeltavaa olla suurempi kuin uumasauvojen, joten valitaan 150x150x10 paarteeksi.

Sopivan I-profiilin valintaa varten lasketaan poikkileikkauksen vaatima neiliömomentti Eulerin nurjahduksen kaavaa hyödyntäen:

$$N_{cr} := F_{paarre_puristus} = 759.375 \text{ kN} \quad L_{cr} := 3000 \text{ mm}$$

$$I_{cr} := N_{cr} \cdot \frac{L_{cr}^2}{E_{teräs} \cdot \pi^2} = (3.297 \cdot 10^6) \text{ mm}^4$$

Valitaan HEB140 paarteeksi. Kuten aiemmin jo todettu, on parempi valita suurempi seinämävahvuus paarteelle. Tässä tapauksessa suurempi laipan paksuus on eduksi. Tästä syystä suositetaan tässä laskennassa HEB-sarjaa HEA-sarjan sijaan.

Nurjahduskäyrä vahvan akselin suhteen on b, ja heikomman akselin suhteen c. Lisäksi oletetaan, että poikkileikkausluokka on 1.

$$I_{HEB140} := 5.497 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad A_{HEB140} := 4926 \text{ mm}^2 \quad f_y := 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\alpha_c := 0.49$$

$$\alpha_b := 0.34$$

$$N_{crHEB140} := \frac{I_{HEB140} \cdot E_{teräs} \cdot \pi^2}{L_{cr}^2} = (1.266 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

$$\gamma_{M1} := 1$$

$$\lambda := \sqrt{\left(A_{HEB140} \cdot \frac{f_y}{N_{crHEB140}} \right)} = 1.175$$

$$\phi_b := 0.5 \cdot (1 + \alpha_b \cdot (\lambda - 0.2) + \lambda^2) = 1.357$$

$$\phi_c := 0.5 \cdot (1 + \alpha_c \cdot (\lambda - 0.2) + \lambda^2) = 1.43$$

$$\chi_b := \frac{1}{\phi_b + \sqrt{\phi_b^2 - \lambda^2}} = 0.492$$

$$\chi_c := \frac{1}{\phi_c + \sqrt{\phi_c^2 - \lambda^2}} = 0.446$$

$$N_{b_Rd_b_HEB140} := \frac{\chi_b \cdot A_{HEB140} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 859.838 \text{ kN} \quad N_{b_Rd_c_HEB140} := \frac{\chi_c \cdot A_{HEB140} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 779.427 \text{ kN}$$

Heikomman akselin suhteen laskentatuloksena on turhan lähellä paarteeseen laskettua puristusvoimaa. Kasvatetaan profiili kokoon HEB180, koska alkuarvaus sisältää vain putkiston kuormituksen.

$$I_{HEB180} := 13.63 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad A_{HEB180} := 6525 \text{ mm}^2$$

Kuva 40. Paarteen alkuarvaus.

$$N_{crHEB180} := \frac{I_{HEB180} \cdot E_{teräs} \cdot \pi^2}{L_{cr}^2} = (3.139 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

$$\lambda_{HEB180} := \sqrt{\left(A_{HEB180} \cdot \frac{f_y}{N_{crHEB180}} \right)} = 0.859$$

$$\phi_{b_HEB180} := 0.5 \cdot (1 + \alpha_b \cdot (\lambda_{HEB180} - 0.2) + \lambda_{HEB180}^2) = 0.981$$

$$\chi_{b_HEB180} := \frac{1}{\phi_{b_HEB180} + \sqrt{\phi_{b_HEB180}^2 - \lambda_{HEB180}^2}} = 0.687$$

$$N_{b_Rd_b_HEB180} := \frac{\chi_{b_HEB180} \cdot A_{HEB180} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = (1.592 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

$$\phi_{c_HEB180} := 0.5 \cdot (1 + \alpha_c \cdot (\lambda_{HEB180} - 0.2) + \lambda_{HEB180}^2) = 1.03$$

$$\chi_{c_HEB180} := \frac{1}{\phi_{c_HEB180} + \sqrt{\phi_{c_HEB180}^2 - \lambda_{HEB180}^2}} = 0.625$$

$$N_{b_Rd_c_HEB180} := \frac{\chi_{c_HEB180} \cdot A_{HEB180} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = (1.448 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

Nurjahduksen suhteen HEB180 on varmalla puolella.

Uuma sauvat valitaan palkkianalogian mukaisesti suurimman leikkausvoiman perusteella. Suurin leikkausvoima kuormittaa palkin päässä, joka vastaa tukireaktion suuruutta.

$$F_{tukireaktio_ristikko} := \gamma \cdot Q_{viivakuorma_ristikolle} \cdot \frac{L_{ristikko}}{2} = 126.563 \text{ kN}$$

Valitaan putkiprofiiliksi 120x120x6 SSAB:n taulukon mukaisesti.

$$N_{cr} := F_{tukireaktio_ristikko} \quad I_{cr} := N_{cr} \cdot \frac{L_{cr}^2}{E_{teräs} \cdot \pi^2} = (5.496 \cdot 10^5) \text{ mm}^4$$

Valitaan I-profiiliksi HEA140. Tarkastetaan profiilin valinta samalla tavalla kuin paarteen valinta. Alkuarvaus perustuu samalla myös kannatinpalkin valintaan I-profiilia määrittettäessä. Nurjahduskäyrät ovat b ja c HEA140 tapauksessa.

$$I_{HEA140_yy} := 10.33 \cdot 10^6 \text{ mm}^4 \quad A_{HEA140} := 3142 \text{ mm}^2 \quad I_{HEA140_zz} := 3.893 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$N_{crHEA140_yy} := \frac{I_{HEA140_yy} \cdot E_{teräs} \cdot \pi^2}{L_{cr}^2} = (2.379 \cdot 10^3) \text{ kN}$$

Kuva 41. Paarteen I-profiilin laskenta ja ristikon sauvojen valinta.

$$\lambda_{HEA140_yy} := \sqrt[2]{\left(A_{HEA140} \cdot \frac{f_y}{N_{crHEA140_yy}}\right)} = 0.685$$

$$\phi_{b_HEA140_yy} := 0.5 \cdot \left(1 + \alpha_b \cdot (\lambda_{HEA140_yy} - 0.2) + \lambda_{HEA140_yy}^2\right) = 0.817$$

$$\chi_{b_HEA140_yy} := \frac{1}{\phi_{b_HEA140_yy} + \sqrt{\phi_{b_HEA140_yy}^2 - \lambda_{HEA140_yy}^2}} = 0.792$$

$$N_{b_Rd_b_HEA140_yy} := \frac{\chi_{b_HEA140_yy} \cdot A_{HEA140} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 883.689 \text{ kN}$$

$$N_{crHEA140_zz} := \frac{I_{HEA140_zz} \cdot E_{teräs} \cdot \pi^2}{L_{cr}^2} = 896.522 \text{ kN}$$

$$\lambda_{HEA140_zz} := \sqrt[2]{\left(A_{HEA140} \cdot \frac{f_y}{N_{crHEA140_zz}}\right)} = 1.115$$

$$\phi_{c_HEA140_zz} := 0.5 \cdot \left(1 + \alpha_c \cdot (\lambda_{HEA140_zz} - 0.2) + \lambda_{HEA140_zz}^2\right) = 1.346$$

$$\chi_{c_HEA140_zz} := \frac{1}{\phi_{c_HEA140_zz} + \sqrt{\phi_{c_HEA140_zz}^2 - \lambda_{HEA140_zz}^2}} = 0.476$$

$$N_{b_Rd_c_HEA140_zz} := \frac{\chi_{c_HEA140_zz} \cdot A_{HEA140} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 531.059 \text{ kN}$$

Nurjahduksen suhteen HEA140 on varmalla puolella.

Päätykehän sauvoiksi valitaan suuremmat profiilit, koska päätykehän jäykistäminen täytyy toteuttaa jäykillä liitoksilla. Päätykehät myös välittävät paarteiden kuormitukset putkisillan pilareille.

Putkiprofiiliksi valitaan 180x180x10, koska tämä mahdollistaa paarteen hitsausliitoksen päätykehään.

I-Profiiliksi valitaan HEB220. Tähän perusteena on profiilin kasvattaminen suurin piirtein samassa suhteessa kuin putkiprofiilin tapauksessa.

Pilareiksi valitaan HEB240 ja 200x200x10. Valinta perustuu päätykehän profiiliin. Pilareiden jäykisteiksi valitaan HEA120 ja 120x120x6.

Paikalleen rakennettavan putkisillan päätykehä koostuu pilareista ja kannatinpalkeista. Pilareiden poikkileikkauksena käytetään alkuarvauksena HEB240 ja 200x200x10 profiileja.

Kuva 42. Rakennejärjestelmän muiden profiilien valinta.

PUTKISILLAN KUORMITUSYHDISTELMÄT ASCE 7 MUKAISESTI

$$\begin{aligned}
 & 1.4 (D_s + D_o + F_f + T + A_f) & (5) \\
 & 1.4 (D_s + D_t) \\
 & 1.2 (D_s + D_o + F_f + T + A_f) + 1.6L \\
 & 1.2 (D_s + D_o + A_f) + (1.6W \text{ tai } 1.0E_o) + 0.5L \\
 & 1.2 (D_s + D_t) + 1.6W_{\text{partial}} \\
 & 0.9 (D_s + D_e) + 1.6W \\
 & 0.9 (D_s + D_o) + 1.2A_f + 1.0E_o \\
 & 0.9 (D_s + D_e) + 1.0E_o
 \end{aligned}$$

, missä

A_f on putkiston kiintopisteille syntyvä kuormitus

D_s on putkisillan teräsrakenteen omapaino

D_o on putkiston käyttöpaino

D_t on putkiston paino koekäyttötilanteessa

D_e on putkiston tyhjäpaino

F_f on putkiston aiheuttama kitkakuorma

T on putkisillan rakenteiden lämpölaajenemisen aiheuttama voima

L on hyötykuorma

W on tuulikuorma

W_{partial} on ASCE 7 standardin määrittelemä 30,4 m/s tuulennopeuteen perustuva tuulikuorma

E_o on käytönaikainen maanjäristyskuorma

E_e on tyhjän putkiston aikainen maanjäristyskuorma. (Drake & Walter 2010)